



HAL
open science

Les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur : application au domaine de la formation médicale.

Anne-Sophie Milcent

► To cite this version:

Anne-Sophie Milcent. Les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur : application au domaine de la formation médicale.. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE014 . tel-03017275

HAL Id: tel-03017275

<https://theses.hal.science/tel-03017275v1>

Submitted on 20 Nov 2020

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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire LAMPA – Campus d'Angers

THÈSE

présentée par : **Anne-Sophie MILCENT**

soutenue le : **15 juin 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Industriel - Conception & Innovation**

**Les agents virtuels expressifs et leur impact sur
l'induction de l'empathie chez l'utilisateur :
application au domaine de la formation médicale.**

THÈSE dirigée par :
Pr. RICHIR Simon

et co-encadrée par :
Dr. KADRI Abdelmajid
Dr. GESLIN Erik

Jury

Mme. Catherine PELACHAUD, Directrice de Recherche, CNRS, ISIR, UPMC

Mme. Magalie OCHS, Maître de Conférences, LIS, Aix Marseille Université

M. Jean-Claude MARTIN, Professeur des Universités, LIMSI-CNRS, Université Paris-Sud

M. Abdelmajid KADRI, Docteur, LAMPA - PI, ENSAM

M. Erik GESLIN, Docteur, LAMPA - PI, ENSAM, UCO

M. Simon RICHIR, Professeur des Universités, LAMPA - PI, ENSAM

M. Olivier GARDINETTI, Directeur Technique, SimforHealth

Présidente
Rapporteure
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

À mes parents et grands-parents,

Résumé

Agents pédagogiques, personnages de jeu vidéo, conseillers ou assistants virtuels, les agents virtuels sont de plus en plus présents dans notre quotidien. Certains attirent notre attention, semblent nous montrer de l'intérêt, être aptes à communiquer et à nous exprimer leurs états émotionnels. Ces agents ont fait l'objet de nombreuses investigations dans diverses disciplines telles que l'informatique, la psychologie ou encore les sciences cognitives.

Les travaux de cette thèse de doctorat portent sur les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur. L'évolution des techniques de l'informatique graphique permet aujourd'hui de créer des agents virtuels réalistes au niveau visuel et comportemental. L'expressivité des agents est un enjeu important pour les interactions humain-machine. Cependant, il est encore peu fréquent que les agents virtuels soient dotés d'expressions faciales, limitant alors leur possibilité d'induire de l'empathie chez l'utilisateur.

Nos travaux font suite aux perspectives de recherche concernant la retranscription des émotions sur un agent virtuel, et contribuent à étendre les connaissances concernant les interactions avec les agents, notamment l'impact de leur expressivité sur la mise en place d'une situation empathique. Pour mener à bien ces travaux, nous avons conduit deux expérimentations. Notre première expérimentation porte sur la reconnaissance des émotions de base sur un agent virtuel conçu à partir de techniques de modélisation avancée. Cette étude a également permis d'évaluer la pertinence de facteurs d'expressivité humaine sur l'agent, notamment les rides d'expression et la variation de la taille pupillaire en fonction de l'état émotionnel, pour faciliter la perception des émotions de celui-ci. Notre seconde expérimentation porte sur l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur. Dépendants du contexte, les résultats démontrent que la prise de perspective de l'utilisateur, composante cognitive de l'empathie, est plus importante lorsque l'agent virtuel réaliste possède des expressions faciales. Enfin, nous avons étudié l'impact de l'expressivité des agents sur l'engagement et la présence sociale de l'utilisateur. Cette étude ouvre des perspectives concernant une potentielle corrélation entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement.

Mots clés : *Agent virtuel ; expressivité ; empathie ; réalisme ; émotions ; santé.*

Abstract

Pedagogical agents, non-player characters, virtual advisors or assistants, virtual agents are more and more present in our daily life. Some attract our attention, seem to show us interest, to be able to communicate and to express their emotional states. These agents have been the subject of numerous investigations in various fields of research such as computer science, psychology or cognitive sciences.

The work of this PhD thesis focuses on the expressive virtual agents and their impact on the user empathy induction. The evolution of computer graphics techniques now makes it possible to create virtual agents that are visually and behaviorally realistic. The expressiveness of agents is an important issue for human-computer interactions. However, it is still rare for virtual agents to be equipped with facial expressions, thus limiting their ability to induce empathy in the user.

Our work follows up on the perspectives opened by researchers in the field concerning the transcription of emotions on a virtual agent, and contributes to extend the knowledge concerning interactions with agents, in particular the impact of their expressiveness on the implementation of an empathetic situation. To carry out this work, we conducted two experiments. The first one deals with the recognition of basic emotions on a virtual agent designed using advanced modeling techniques. This study also allowed us to evaluate the relevance of human expressiveness factors on the agent, notably the presence of expression wrinkles and the variation of pupil size according to the emotional state, to facilitate the perception of the agent's emotions. Our second experiment focuses on the impact of the virtual agent's facial expressiveness on the user's empathy. Depending on the context, the results show that user's perspective taking, the cognitive component of empathy, is greater when the realistic virtual agent presents emotional facial expressions compared to an agent who has no facial expressions. Finally, we studied the impact of the agents' expressiveness on the user's engagement and social presence. This study opens perspectives on a potential correlation between the notions of empathy, social presence and engagement.

Keywords : *Virtual agent ; expressiveness ; empathy ; realism ; emotions ; health.*

Remerciements

Je souhaite dans un premier temps adresser mes remerciements au Pr Simon Richir pour la confiance qu'il m'a accordée m'ayant permis de mener à bien mes travaux de thèse. Je remercie le Dr Abdelmajid Kadri et le Dr Erik Geslin pour leur co-encadrement et leur soutien tout au long de ces trois années de thèse. Je tiens également à remercier le Dr Olivier Christmann et le Dr Geoffrey Gorisse pour leurs précieux conseils, leur rigueur ainsi que le temps qu'ils m'ont accordé, contribuant à l'aboutissement de cette thèse. J'adresse une pensée particulière à Charles, Samory, Marie, Benjamin ainsi qu'à tous les membres de l'équipe Présence & Innovation pour leur aide et leur soutien, et qui ont rendu si agréable chaque semaine au laboratoire. J'adresse également mes remerciements à Jérôme Leleu et à Olivier Gardinetti pour m'avoir accueilli au sein de SimforHealth, pour m'avoir accordé leur confiance et pour les moyens mis en oeuvre afin de me permettre de mener mes expérimentations. J'adresse également une pensée particulière à Xavier, Clément, Sébastien, Clémentine, ainsi qu'à tous les membres de l'équipe pour leurs encouragements et leur bonne humeur au quotidien. Je souhaite également remercier les Instituts de Formation en Soins Infirmiers qui m'ont permis de réaliser mon étude au sein de leur établissement, ainsi que les participants.

Sur le plan personnel, je souhaite tout d'abord remercier mes parents. Je tiens à leur exprimer sincèrement toute ma gratitude pour leur bienveillance, leurs encouragements et leur soutien indéfectible dans tout ce que j'entreprends. Je souhaite également remercier toute ma famille, et particulièrement mon frère et sa compagne ainsi que mes grands-parents à qui je tiens à témoigner toute l'admiration que je leur porte. J'ai une pensée particulière pour mes amis qui m'ont soutenue et qui ont égayé mon quotidien, me permettant de traverser les bons moments comme les plus difficiles. Enfin, je tiens à remercier mon conjoint pour sa patience, son amour et son éternel soutien sans quoi rien de tout cela n'aurait été possible.

Merci à tous ceux qui m'ont soutenue et qui ont participé, de près ou de loin, directement ou indirectement, à l'aboutissement de cette thèse. Merci pour tout.

Anne-Sophie

Publications

Journaux internationaux à comité de lecture

Milcent, A.-S., Kadri, A., Geslin, E. et Richir, S. (2019). The expressiveness of virtual agents : transcription of visual factors promoting the recognition of emotions - Expressive wrinkles and variation of pupil size. *Journal on Multimodal User Interfaces*. **(En cours de revue)**

Milcent, A.-S., Kadri, A. et Richir, S. (2020). Using facial expressiveness of a virtual agent to induce empathy in users. *International Journal of Human-Computer Interaction*. **(Soumis)**

Actes de conférences internationales

Milcent, A.-S., Geslin, E., Kadri, A. et Richir, S. (2019). Expressive Virtual Human : Impact of expressive wrinkles and pupillary size on emotion recognition. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 215–217. ACM.

Decormeille, G., Milcent, A.-S., Huet, N., Geeraerts, T. Quels sont les facteurs influençant l'apprentissage des étudiants infirmiers par simulation numérique? *Congrès international francophone de pédagogie en sciences de la santé.*, Strasbourg, France. **(En cours de revue)**

Actes de conférences nationales à comité de lecture

Milcent, A.-S., Kadri, A., Geslin, E. et Richir, S. (2019). Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur la présence sociale et l'engagement. Travaux en Cours. *31e conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2019)*, Grenoble, France. **(Accepté comme poster, non publié dans les actes)**

Milcent, A.-S., Kadri, A., Geslin, E. et Richir, S. (2019). Les humains virtuels expressifs dans les simulateurs en santé. *Journée IHM & Santé*, Mai 2019, Metz, France.

Table des matières

Table des matières	xiii
Liste des figures	xvii
Liste des tableaux	xxi
1 Introduction	1
1.1 Motivations et origine du projet doctoral	2
1.2 Problématiques et périmètre de recherche	5
1.3 Structure du mémoire de thèse	7
2 État de l’art	11
2.1 Structure de la revue de littérature	12
2.2 Empathie et émotions : contexte théorique	13
2.2.1 Théories de l’empathie	13
2.2.2 Empathie et théorie des émotions	21
2.2.3 Mesure des réactions émotionnelles et empathiques	29
2.3 Les agents virtuels	34
2.3.1 Expressivité des agents virtuels	35
2.3.2 Réalisme visuel et comportemental	43
2.3.3 Impact des agents virtuels expressifs sur l’interaction humain-machine	54
2.4 Les agents virtuels et l’empathie	56
2.4.1 Les agents empathiques et leurs modèles	56
2.4.2 Création d’une situation empathique en environnements virtuels . . .	59
2.4.3 Induire de l’empathie à l’aide des agents virtuels	67
2.5 Agents virtuels induisant l’empathie : impact sur l’utilisateur et son expérience	71
2.5.1 Les agents virtuels expressifs, l’engagement et la présence sociale . . .	71
2.5.2 Les agents virtuels expressifs et l’apprentissage	75
2.6 Synthèse de l’état de l’art et poursuite des travaux	79

3	Expérimentation 1 : Reconnaissance des émotions sur un humain virtuel	83
3.1	Résumé	84
3.2	Présentation de l'expérimentation	85
3.3	Matériel et méthodes	86
3.3.1	Application	86
3.3.2	Participants	90
3.3.3	Procédure	90
3.3.4	Mesures	92
3.3.5	Hypothèses	93
3.4	Résultats	94
3.4.1	Reconnaissance des émotions et confusions	94
3.4.2	Analyse de la reconnaissance des émotions	96
3.4.3	Impact de l'absence de la variation de la taille des pupilles	98
3.4.4	Impact de l'absence des rides d'expression	99
3.4.5	Acceptabilité, expressivité et exagération	100
3.5	Discussion	103
3.5.1	Reconnaissance des émotions de base sur un humain virtuel	103
3.5.2	Reconnaissance des émotions sur les humains virtuels et l'humain réel	103
3.5.3	Impact de l'absence des rides d'expression et de la variation pupillaire sur la reconnaissance	105
3.5.4	Limites de l'étude	106
3.5.5	Introduction à la seconde expérimentation	106
4	Expérimentation 2 : Impact des agents virtuels expressifs sur l'empathie de l'utilisateur	109
4.1	Résumé	110
4.2	Présentation de l'expérimentation	111
4.3	Matériel et méthodes	112
4.3.1	Application	112
4.3.2	Participants	114
4.3.3	Procédure	115
4.3.4	Mesures	118
4.3.5	Hypothèses	121
4.4	Résultats	122
4.4.1	Humeur et habitudes	122
4.4.2	Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'empathie . . .	124

4.4.3	Sentiment de similarité et lien affectif	127
4.4.4	Sentiment de présence sociale et engagement	128
4.5	Discussion	132
4.5.1	Empathie	132
4.5.2	Agent virtuel expressif, sentiment de similarité et lien affectif	134
4.5.3	Agent virtuel expressif, présence sociale et engagement	135
4.5.4	Retour d'expérience sur les simulateurs en soins infirmiers	136
4.5.5	Limites de l'étude	136
5	Conclusion	139
5.1	Contextualisation des travaux	140
5.2	Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses	141
5.3	Contribution, apports théoriques et expérimentaux	144
5.4	Perspectives et travaux futurs	146
	Bibliographie	148
A	Processus de conception de l'agent virtuel	177
A.1	L'agent virtuel expressif	178
A.2	Améliorations dédiées à la seconde expérimentation	184
B	Annexes à l'expérimentation 1	187
B.1	Durée des animations faciales	188
B.2	Figures complémentaires	188
B.3	Taux de reconnaissance des émotions selon les quatre conditions	189
B.4	Questionnaire post-expérimentation	190
C	Annexes à l'expérimentation 2	191
C.1	Comparaison des solutions de captations faciales	192
C.2	Documentation des mesures effectuées à l'aide du dispositif Affectiva	193
C.3	Figures complémentaires	194
C.4	Questionnaire QCAE de Reniers <i>et al.</i> [2011]	194
C.5	Questionnaire présence sociale et engagement	196
C.6	Questionnaire post-expérimentation	197
C.7	Matrice de corrélation concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement	197

Liste des figures

1.1	Illustration de simulateurs conçus par SimforHealth	3
2.1	Expression des émotions de base [Ekman et Friesen, 2003]	22
2.2	Représentation anatomique des muscles faciaux - <i>The Artist's Guide to the Anatomy of the Human Head : Defining Structure and Capturing Emotions</i> [3D Total Publishing, 2017]	26
2.3	Description des Unités d'Actions pour une expression de peur [Ekman et Friesen, 2003]	26
2.4	Les phases temporelles d'une des expressions faciales de la joie [Wu <i>et al.</i> , 2014]	27
2.5	Techniques associées à l'animation paramétrique	37
2.6	Exemple de <i>motion capture</i> de l'acteur Mads Mikkelsen pour le jeu <i>Death Stranding</i> - Sony Interactive Entertainment 2019	38
2.7	Agents sans ou avec rides d'expression, issus des travaux de Courgeon [2011]	39
2.8	Illustration issue des travaux de [Jimenez <i>et al.</i> , 2010a]. Adaptation de la couleur de la peau des agents en fonction des émotions. De gauche à droite : tristesse accompagnée d'un sourire forcé, colère, neutre, peur et dégoût. . . .	40
2.9	Les agents GRETA, MAX et EMMA	42
2.10	Rendu des agents virtuels dont la forme du visage et des yeux ont été modifiées [Ferstl et McDonnell, 2018]. Au centre les visages les plus fins, aux extrémités les visages les plus larges.	44
2.11	Exemple de différents styles graphiques appliqués aux agents virtuels (de gauche à droite : du moins réaliste au plus réaliste), extrait de McDonnell <i>et al.</i> [2012].	45
2.12	Stylisation des corps à partir d'un scan 3D, extrait de Fleming <i>et al.</i> [2016] .	46
2.13	Rendu d'une peau réaliste d'un agent virtuel par D'Eon <i>et al.</i> [2007] (a), et par Jimenez <i>et al.</i> [2010b] (b)	46
2.14	Le visage de gauche et l'oreille gauche sont des rendus sans SSS alors le visage de droite et l'oreille de droite prennent en compte le SSS [Jimenez <i>et al.</i> , 2010b]	47

2.15	Illustration du même personnage rendu avec deux niveaux de réalisme différents, dépendant du type de <i>shader</i> utilisé - SimforHealth	47
2.16	Impact des éclairages sur la perception de l'agent virtuel par l'utilisateur [Wissensing <i>et al.</i> , 2016]	48
2.17	Illustration des visèmes permettant une animation adaptée lors des dialogues	49
2.18	Courbe de la théorie de l' <i>Uncanny Valley</i> [Mori <i>et al.</i> , 2012, 1970] illustrant la variation entre la ressemblance humaine et l'acceptabilité d'une entité immobile et animée	51
2.19	Illustrations issues de jeux vidéos et de films dont les personnages présentent différents niveaux de réalisme et d'expressivité. Les personnages des figures c) et d) ont engendré de nombreuses critiques négatives vis-à-vis de leur réalisme visuel et comportemental, évoquant le phénomène de l' <i>Uncanny Valley</i> [Mori <i>et al.</i> , 2012, 1970].	52
2.20	a) Situation empathique intégrant un agent cible de l'empathie de l'utilisateur. b) Situation empathique intégrant un agent exprimant de l'empathie [Paiva <i>et al.</i> , 2017]	56
2.21	Modèle d'empathie (notre traduction) [Rodrigues <i>et al.</i> , 2009, 2015]	58
2.22	Synthèse des principaux facteurs impliqués dans la mise en place d'une situation empathique	66
2.23	Illustration des projets analysant la similarité et l'appartenance à un groupe comme facteur d'empathie. a) Projet FearNot! [Hall <i>et al.</i> , 2005b], b) Projet de Hasler <i>et al.</i> [2017], c) Projet de Slater <i>et al.</i> [2013]	67
2.24	Illustration du projet sur les violences conjugales de Seinfeld <i>et al.</i> [2018]. Lors de la première phase (a à c), le participant incarne une femme. Lors de la seconde phase (d à f), un agent violent apparaît et s'en prend à elle.	69
2.25	Illustration du projet de Hasler <i>et al.</i> [2014]	70
2.26	Niveaux et dimensions de la présence sociale de Biocca et Harms [2002]	72
3.1	Création des <i>blendshapes</i> à partir des Unités d'Action	87
3.2	Avant et après l'application d'une <i>wrinkle map</i> sur le modèle 3D	88
3.3	Dilatation et contraction des pupilles	88
3.4	Extraits issus de la bibliothèque MMI	89
3.5	Exemple de la phase de reconnaissance des émotions	91
3.6	Taux de reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels (en %).	94
3.7	Résumé des réponses des participants et de leur niveau de certitude (en %) pour la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels.	95

3.8	Reconnaitances et confusions pour les émotions (en %)	96
3.9	Résumé des réponses des participants sur l'acceptabilité A, l'expressivité EXP et l'exagération EXA de l'humain réel (R) et des humains virtuels (V).	100
3.10	Avis des participants sur les difficultés potentiellement rencontrées lors de la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels, en %	101
3.11	Résumé des réponses à la question concernant les émotions dont la représentation était dérangeante pour les participants, en %	102
4.1	Illustration de l'humain virtuel expressif	110
4.2	Rendus de l'environnement virtuel et de la patiente intégrée dans l'environnement	113
4.3	Rendu de l'humain virtuel expressif	113
4.4	Répartition homme-femme et pyramide des âges en 2015 pour la profession infirmière ³	115
4.5	Illustration de la patiente virtuelle lors de la situation 1 du simulateur en santé	117
A.1	Processus de photogrammétrie	178
A.2	Photo et scan "Female 02" - Ten24	179
A.3	Package du scan "Female 02" - Ten24	179
A.4	Points d'ancrage du scan 3D vers le modèle low poly	180
A.5	a) Texture issue du scan 3D et b) texture obtenue après projection sur le modèle <i>low poly</i>	181
A.6	Récupération des Unités d'Action (AU) à partir des scans	181
A.7	Nettoyage de scan afin de récupérer les rides d'expression	183
A.8	Modèle avant ou après l'application d'une <i>wrinkle map</i> sur le maillage du modèle 3D	183
A.9	Adaptation du maillage du corps optimisé (à gauche) et du corps scanné (centre) pour obtenir le corps de l'agent virtuel (à droite).	185
A.10	Création des visèmes avec le plugin Lypsinc Pro	185
B.1	Représentation des émotions de colère et de joie sur l'humain virtuel V	188
B.2	Représentation de l'émotion de tristesse à la même temporalité dans les conditions V, V-sP et V-sRE.	188
C.1	Interface lors des choix de questions	194
C.2	Tutoriel lors de la phase d'accomodation	194

Liste des tableaux

2.1	Facteurs de modulation de l'empathie [De Vignemont et Singer, 2006]	17
2.2	Synthèse des régions faciales les plus déterminantes pour la reconnaissance des six émotions de base [Khan <i>et al.</i> , 2012]	27
2.3	Synthèse des questionnaires permettant l'auto-évaluation de l'empathie	31
3.1	Résultats du test de Wilcoxon concernant la comparaison de la reconnaissance avec les conditions R et V	97
3.2	Résumé statistique du niveau de certitude et du temps de réponse pour la reconnaissance sur l'humain réel R et l'humain virtuel V	98
3.3	Résumé statistique du niveau de certitude et du temps de réponse pour la reconnaissance sur l'humain virtuel V et l'humain virtuel sans rides V-sRE	99
4.1	Tableau des établissements et nombre de participants ayant testés le simulateur	115
4.2	Organisation des passations lors de la simulation	116
4.3	Résultats moyens concernant les humeurs des participants (Échelle de Likert sur 5 points)	122
4.4	Tableau de corrélation concernant l'affectivité positive et négative, l'âge et les dimensions de l'empathie pour la situation 1 (Affectivité Positive - AP, Affectivité Négative - AN, Prise de perspective - PP, Simulation - S, Contagion Émotionnelle - CE, Réactivité proximale - RPR, Réactivité périphérique - RPE)	123
4.5	Tableau de corrélation concernant l'affectivité positive et négative, l'âge et les dimensions de l'empathie pour la situation 2 (Affectivité Positive - AP, Affectivité Négative - AN, Prise de perspective - PP, Simulation - S, Contagion Émotionnelle - CE, Réactivité proximale - RPR, Réactivité périphérique - RPE)	124
4.6	Impact de l'expressivité des agents virtuels réalistes sur les dimensions de l'empathie	125

4.7	Extrait de la matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 1. (Co-présence - CO, Interdépendance émotionnelle perçue - IEP, Esthétique - E, Satisfaction - Sa)	128
4.8	Extrait de la matrice de corrélation des dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 2. (Co-présence - CO, Interdépendance émotionnelle perçue - IEP, Esthétique - E, Satisfaction - Sa)	129
4.9	Résumé des réponses des participants au questionnaire post-expérimentation	131
A.1	Exemple de tableau de correspondance des AUs pour l'expression des émotions de base	182
A.2	Dilatation ou contraction des pupilles en fonction de l'état émotionnel	184
B.1	Durée des animations des expressions faciales émotionnelles	188
B.2	Résumé des réponses des participants (en %) pour la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels	189
C.1	Synthèse des solutions étudiées de captations d'expressions faciales	192
C.2	Matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 1.	198
C.3	Matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 2.	199

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Motivations et origine du projet doctoral	2
1.2	Problématiques et périmètre de recherche	5
1.3	Structure du mémoire de thèse	7

1.1 Motivations et origine du projet doctoral

Que ce soit dans un livre, un jeu ou une expérience de réalité virtuelle, il existe une relation particulière entre un individu et un personnage. Conscient que c'est une expérience fictive, un utilisateur est tout de même apte à développer de l'affection envers ce personnage. L'utilisateur peut le considérer, l'aider, partager ses buts et ses attentes. L'empathie envers un personnage provient d'une identification à la situation et au personnage ainsi que de la préoccupation et de l'attachement envers celui-ci. Il semble que ce soit ce partage et cette appropriation des objectifs qui rendent possibles les émotions de l'utilisateur. Perron définit les réactions émotionnelles envers un personnage telles que « *des émotions qui tirent leur origine de la position de témoin du joueur et qui naissent aussi de la comparaison des événements fictifs concentrés et magnifiés avec le potentiel affectif d'événements comparables de la vie de tous les jours* » [Perron, 2005].

Les personnages intégrés aux environnements virtuels, nommés agents virtuels dès lors qu'ils ne sont pas contrôlés par un utilisateur, sont de plus en plus présents dans notre quotidien. Ils font l'objet d'investigations dans diverses disciplines telles que l'informatique, la psychologie, les neurosciences ou encore les sciences cognitives. Issue d'une formation en modélisation 3D, je m'interroge lors de la conception de ces agents, sur nos rapports avec ces derniers, sur leur impact sur l'expérience utilisateur ainsi que sur la place des émotions dans ce contexte d'interaction humain-machine. Les agents sont-ils en capacité de générer des réactions émotionnelles chez l'utilisateur ? La dimension émotionnelle influe-t-elle, et à quel niveau, sur la relation entre l'utilisateur et l'agent ? Quels sont les facteurs permettant la mise en place de situations émotionnelles et empathiques ? Nous nous interrogeons sur l'évolution et l'impact de l'expressivité, du réalisme visuel et comportemental de l'agent virtuel sur l'expérience utilisateur. Il subsiste des interrogations concernant l'impact potentiel des interactions sociales avec des agents, sur nos comportements, nos états mentaux ainsi que nos réactions émotionnelles et empathiques.

Ces interrogations sont en lien avec l'informatique affective dont la thématique de recherche réside dans l'étude des interactions basées sur les émotions entre l'agent virtuel et l'utilisateur afin de mieux appréhender leurs impacts sur les interactions humain-machine. Ce domaine de recherche a pour but de concevoir des systèmes ayant les capacités de reconnaître, d'exprimer, de communiquer, de répondre ou encore de modéliser les émotions [Picard, 1995, 2003]. Il se divise en deux courants de recherche : la conception de systèmes capables de reconnaître les émotions de l'utilisateur et la modélisation de processus émotionnels dans les

systèmes. Concernant la modélisation des émotions, il existe trois sous-processus : le déclenchement de l'émotion, l'expression des émotions et l'influence des émotions sur les processus cognitifs, tels que présenté dans les travaux de Ochs [2007]. Dans le cadre de nos travaux, nous nous focalisons sur l'expression des émotions sur des entités virtuelles. Il existe deux approches concernant la modélisation des émotions des agents, une approche orientée agent, visant à améliorer les performances de l'agent virtuel telles que son adaptabilité, ainsi qu'une approche orientée utilisateur, visant à améliorer l'expérience et les performances de l'utilisateur lors de ses interactions avec l'agent [Ochs, 2007]. Nous nous concentrons sur une approche orientée utilisateur afin d'étudier l'impact des émotions de l'agent virtuel sur l'utilisateur et son expérience.

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre des activités de recherche et développement de la société Groupe Interaction et de son pôle de simulation numérique SimforHealth.

SimforHealth est spécialisé dans la conception de simulateurs pour la formation des professionnels de la santé depuis 2016. L'entreprise met en avant l'utilisation d'environnements virtuels permettant l'enseignement des procédures diagnostiques et thérapeutiques, la reproduction de situations cliniques dans un environnement de soins ainsi que la répétition des processus ou des prises de décision par un professionnel de santé (Figure 1.1).

Dans la continuité de nos interrogations sur la représentation des états émotionnels des agents virtuels et leurs impacts sur l'utilisateur, un projet doctoral est né d'intérêts communs sur la problématique de la conception d'agents virtuels expressifs favorisant potentiellement l'empathie de l'utilisateur.



FIGURE 1.1 – Illustration de simulateurs conçus par SimforHealth

En adéquation avec les activités de l'entreprise, il est nécessaire de prendre en considération que les capacités d'empathie, d'écoute et de disponibilité du soignant sont essentielles pour permettre une bonne prise en charge du patient [Vannotti, 2002]. Cette prise en charge affecte positivement le processus thérapeutique du patient [Lancelot *et al.*, 2009], c'est-à-dire l'évolution de la maladie, l'observance thérapeutique, le stress du patient ainsi que le respect des recommandations provenant du soignant. De récentes études ont démontré qu'une communication empathique pouvait jouer un rôle dans le soulagement de la perception douloureuse (réduction de la perception de la douleur de 12 %) [Fauchon *et al.*, 2019]. Il est nécessaire que le soignant puisse s'entraîner et être sensibilisé à la rencontre avec un patient réel, tel que préconisé par l'Haute Autorité de Santé suite aux besoins en matière de formation médicale : « Jamais la première fois sur le patient »¹. La rencontre de patients virtuels réalistes et expressifs permet au soignant de mieux appréhender et se préparer pour l'exercice réel de ses fonctions.

Enfin, la société SimforHealth accorde une attention particulière à l'expérience utilisateur dans le but de faciliter la compréhension et le transfert de connaissances. Afin de proposer des solutions plus précises et formatrices, ces travaux ont pour but d'améliorer l'expérience de l'utilisateur, notamment en favorisant un engagement émotionnel accru des apprenants face à des patients virtuels. L'implication émotionnelle favorise la mémorisation des contenus et aboutit à un meilleur apprentissage [Tyng *et al.*, 2017], c'est pourquoi ces travaux de recherches portent sur la génération de réactions émotionnelles et empathiques chez l'utilisateur.

1. Haute Autorité de Santé - Rapport de mission : État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé - Dans le cadre du développement professionnel continu (DPC) et de la prévention des risques associés aux soins - Janvier 2012

1.2 Problématiques et périmètre de recherche

Notre sujet de thèse porte sur « les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur ». Nos travaux se proposent de mettre en lumière l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur les interactions entre humains virtuels et humains réels. Ainsi, nos travaux de thèse se focalisent sur l'étude du processus d'empathie chez l'utilisateur envers les agents virtuels, visant à participer aux recommandations concernant l'expressivité des agents virtuels.

Nous aborderons dans notre revue de littérature les notions propres au réalisme visuel et comportemental des agents virtuels. À partir de ces travaux, nous analyserons l'impact des entités virtuelles sur l'empathie de l'utilisateur dans un contexte de formation. L'empathie correspond à la compréhension de l'état émotionnel d'autrui, ce qui implique la reconnaissance des émotions d'autrui, ainsi qu'une réponse affective appropriée à la situation [De Vignemont et Singer, 2006]. La mise en place d'une situation empathique nécessite de prendre en considération les mécanismes de l'empathie, la situation et le contexte, les caractéristiques de l'utilisateur, la modulation de l'empathie ainsi que les caractéristiques de l'agent virtuel [Paiva *et al.*, 2017], facteurs que nous détaillerons dans notre état de l'art. Le périmètre de nos recherches se concentre sur le facteur relatif aux caractéristiques de l'agent, plus précisément nous avons choisi de nous focaliser sur son expressivité.

Afin d'analyser l'induction d'empathie chez l'utilisateur, nous allons tout d'abord évaluer l'expressivité de l'agent virtuel réaliste et expressif. Les travaux entrepris dans le cadre de cette première étude s'articulent autour de la question suivante :

Q1 : L'évolution des processus de conception des agents virtuels, comprenant l'amélioration du réalisme visuel et l'intégration de facteurs d'expressivité humaine, favorise-t-elle la reconnaissance des émotions ?

Dans le cadre de nos recherches, le modèle d'agent retenu est issu d'un processus de conception basé sur des techniques de modélisation avancée telles que la photogrammétrie, et une retranscription des émotions basée sur le FACS². Afin de doter l'agent d'expressions faciales émotionnelles, nous avons analysé les différents facteurs d'expressivité tels que les rides d'expressions et la variation de la taille des pupilles en fonction de l'état émotionnel, dans le but d'ajouter des détails d'expressivité en plus des mouvements musculaires faciaux.

2. Le *Facial Action Coding System* est une méthode de description précise des mouvements musculaires faciaux permettant de définir les expressions faciales à l'aide de combinaisons basées sur des Unités d'Action.

Suite à la conception de cet agent, nous avons étudié la reconnaissance de ses émotions par les utilisateurs.

Dans la continuité de ces premiers travaux de recherche, nous avons évalué l'impact de l'expressivité faciale de l'agent sur l'empathie ressentie par l'utilisateur. C'est dans cet impact que réside l'élément central de nos travaux et duquel découle notre seconde question de recherche :

Q2 : Quel est l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur ?

Cette question de recherche implique également d'autres interrogations sur l'impact des agents virtuels sur l'expérience utilisateur, notamment le sentiment de présence sociale, l'engagement et l'implication émotionnelle de l'utilisateur. Nous détaillerons ces éléments au sein de notre revue de littérature.

Pour conclure et dans le but de délimiter le périmètre de nos travaux, nos recherches sont focalisées sur les interactions entre l'utilisateur et les agents, afin de parfaire l'expérience vécue par l'utilisateur.

1.3 Structure du mémoire de thèse

Le **chapitre 2** présente notre revue de littérature sur les notions investiguées durant ces trois années de thèse. Tout d'abord, nous fournissons un contexte théorique de l'empathie et des émotions, et présentons les différentes méthodes existantes pour les mesurer. Nous introduisons ensuite le concept d'agents virtuels, détaillant l'expression et la reconnaissance des émotions sur ces derniers. Nous restituons par la suite les notions de réalisme visuel et comportemental. Puis nous détaillons l'impact des agents virtuels expressifs sur les interactions humain-machine.

Nous investiguons ensuite le lien entre les agents et l'empathie. Nous définissons l'agent virtuel empathique et nous abordons les facteurs permettant la mise en place d'une situation empathique intégrant des agents virtuels. Enfin, nous détaillons les études antérieures menées sur ce sujet.

Nous évoquons par la suite l'effet des agents virtuels induisant de l'empathie sur l'utilisateur, notamment sur son sentiment de présence sociale et d'engagement. Enfin, en adéquation avec le contexte de nos recherches et les activités de l'entreprise finançant cette thèse, nous présentons les bénéfices liés à l'intégration de ces agents expressifs pour l'apprentissage.

À l'issue des recherches bibliographiques et de la synthèse des projets antérieurs relatifs à nos recherches, les chapitres 3 et 4 exposent les expérimentations effectuées dans le cadre de cette thèse. Chacune des expérimentations sera introduite en détaillant l'objectif, les choix effectués concernant la conception des agents et l'application, la présentation des matériels et méthodes ainsi que les résultats obtenus et leurs discussions.

Le **chapitre 3** présente notre première expérimentation portant sur la conception d'agent virtuel expressif. Cette étude vise à comparer et à analyser la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles d'agents virtuels. L'expression des émotions de l'agent est basée sur le FACS de Ekman et Friesen [1978] et est améliorée à l'aide de facteurs d'expressivité humaine, tels que les rides d'expression et la variation de la taille des pupilles. Cette étude a pour but de participer aux recommandations sur la conception des agents virtuels, et de préparer notre seconde expérimentation pour laquelle il est nécessaire que les utilisateurs soient en mesure de reconnaître les expressions faciales émotionnelles de l'agent virtuel, composante essentielle pour l'induction d'empathie.

Le **chapitre 4** présente notre seconde étude qui a pour but d'étudier l'empathie des utilisateurs envers les agents virtuels expressifs. Afin de mener à bien cette étude, nous utilisons un simulateur dédié à la formation des professionnels de santé. Les participants sont confron-

tés à des patients virtuels dotés ou non d'expressivité faciale. L'objectif de cette recherche porte sur l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur les réactions empathiques des utilisateurs. Cette étude prend également en considération les facteurs de modulation de l'empathie tels que le lien affectif et l'humeur des participants. Dans la continuité de cette expérimentation, nous avons étudié l'impact de l'expressivité faciale des agents sur la présence sociale et l'engagement de l'utilisateur.

Enfin, le **chapitre 5** conclut ce manuscrit en résumant les apports théoriques et expérimentaux issus de nos travaux, et apporte des réponses aux questions de recherches évoquées dans ce chapitre. Nous évoquons également les limites de nos travaux ainsi que les perspectives de futurs travaux de recherche.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1	Structure de la revue de littérature	12
2.2	Empathie et émotions : contexte théorique	13
2.2.1	Théories de l'empathie	13
2.2.2	Empathie et théorie des émotions	21
2.2.3	Mesure des réactions émotionnelles et empathiques	29
2.3	Les agents virtuels	34
2.3.1	Expressivité des agents virtuels	35
2.3.2	Réalisme visuel et comportemental	43
2.3.3	Impact des agents virtuels expressifs sur l'interaction humain-machine	54
2.4	Les agents virtuels et l'empathie	56
2.4.1	Les agents empathiques et leurs modèles	56
2.4.2	Création d'une situation empathique en environnements virtuels . .	59
2.4.3	Induire de l'empathie à l'aide des agents virtuels	67
2.5	Agents virtuels induisant l'empathie : impact sur l'utilisateur et son expérience	71
2.5.1	Les agents virtuels expressifs, l'engagement et la présence sociale . .	71
2.5.2	Les agents virtuels expressifs et l'apprentissage	75
2.6	Synthèse de l'état de l'art et poursuite des travaux	79

2.1 Structure de la revue de littérature

Ce chapitre restitue notre revue de littérature, du contexte théorique aux avancées des recherches effectuées dans notre domaine. Il se divise en quatre axes majeurs. Le premier axe restitue les théories liées à l'empathie et aux émotions afin de donner un cadre théorique à nos travaux de recherche. Le second axe porte sur les agents virtuels, cette section a pour but de définir ce qu'est l'agent et de présenter les avancées relatives à sa conception, notamment concernant son réalisme visuel et comportemental, et particulièrement son expressivité. Le troisième axe met en exergue les liens entre les agents virtuels et l'empathie. Nous abordons les agents empathiques et listons les facteurs facilitant la mise en place d'une situation empathique. Nous présentons également les recherches antérieures sur l'empathie des utilisateurs envers l'agent.

Le dernier axe de notre revue de littérature présente les impacts sur la présence sociale et l'engagement. Enfin, nous abordons l'impact des agents virtuels expressifs et de l'induction d'empathie sur l'apprentissage, notamment lors de l'utilisation de simulateurs dans le domaine de la santé.

2.2 Empathie et émotions : contexte théorique

2.2.1 Théories de l'empathie

Dans cette première partie, nous allons définir le phénomène d'empathie ainsi que ses composantes affectives et cognitives.

L'origine du mot « empathie » vient du terme allemand *Einfühlung*, signifiant *feeling oneself into* en anglais, relatif à la projection de soi-même vers quelque chose ou quelqu'un. Au XIX siècle, le philosophe et psychologue Theodor Lipps introduit le terme *Einfühlung* d'un point de vue esthétique. Il définit cela comme se projeter dans une œuvre d'art lorsque nous la contemplons, dans le but de mieux la comprendre. Puis, il utilise ce terme dans un contexte psychologique et l'étend à la compréhension des Hommes. En 1909, le psychologue anglo-saxon Titchener utilise ce terme pour décrire le fait que les individus se mettent à la place d'autres personnes, en considérant leurs sentiments et leurs pensées. De la traduction de *Einfühlung* né le terme anglais *empathy*.

Au sein de l'ouvrage d'Alain Berthoz consacré à l'empathie, Decety indique : « *Il existe presque autant de définitions du concept d'empathie que d'auteurs écrivant sur le sujet* » [Berthoz et Jorland, 2004]. De fait, dans leurs travaux de recherche, Cuff *et al.* [2016] ont répertorié un grand nombre de définitions de l'empathie. Elle est généralement décrite comme étant la capacité de se mettre à la place d'autrui, toutefois elle est en réalité plus complexe.

Omdahl [1995] définit l'empathie comme étant la compréhension de l'état émotionnel d'autrui ou comme une réponse affective appropriée à la situation d'autrui, ou encore comme étant la combinaison de ces deux propositions. Cela rejoint les propos de Davis [1983] qui divise l'empathie en deux composantes : affective et cognitive. La première composante réside en une réponse affective envers autrui et la seconde composante correspond à la capacité cognitive de prendre la perspective subjective d'autrui. De fait, Decety précise que l'empathie n'implique pas seulement une réponse affective déclenchée par l'état émotionnel d'autrui, elle nécessite également une reconnaissance et une compréhension des états mentaux de cette personne. L'empathie repose sur la capacité à reconnaître qu'autrui nous est semblable mais sans confusion entre nous-même et lui. Cette distinction entre soi et autrui est une caractéristique essentielle de l'empathie [Berthoz et Jorland, 2004]. L'empathie se caractérise comme une capacité à partager les émotions d'autrui [Decety, 2002; Decety et Jackson, 2006]. Son déclenchement est souvent involontaire et non conscient. Une personne empathique peut imaginer prendre le rôle de quelqu'un, voire même prédire ses pensées, ses sentiments ainsi que

ses actions [Mehrabian et Epstein, 1972]. Enfin, selon Hoffman [2001], l'empathie est une réponse affective plus appropriée à la situation d'un autre qu'à sa propre situation. Ce dernier a fourni un modèle de l'empathie, qui requiert d'identifier l'état émotionnel d'autrui afin d'apporter une réponse empathique adaptée.

L'empathie a un rôle central dans les interactions sociales [Narme *et al.*, 2010]. C'est une forme de partage avec les autres individus [Pacherie, 2004]. Pacherie décompose l'empathie en trois degrés. Le premier degré correspond à la compréhension du type d'émotion ressentie par autrui, notamment grâce à l'observation des expressions faciales et vocales. Le second degré est une forme plus élaborée de l'empathie, qui vise à l'identification de l'émotion ressentie par autrui mais également la compréhension de l'objet de l'émotion. Enfin, le troisième degré consiste en la compréhension du type et de l'objet de l'émotion ainsi que de ses raisons, c'est-à-dire les facteurs motivationnels qui ont engendrés cette émotion [Pacherie, 2004].

En s'interrogeant sur ce que ressent autrui et sur la façon d'y apporter une réponse adaptée, Batson [2009] a déterminé qu'il y avait huit concepts distincts relatifs à l'empathie :

- connaître l'état psychologique d'autrui (incluant ses pensées et ses sentiments) ;
- adopter, imiter l'état émotionnel d'autrui ;
- ressentir ce que ressent autrui ;
- se projeter dans la situation d'autrui ;
- imaginer les pensées et les sentiments d'autrui ;
- imaginer nos pensées et nos ressentis à la place d'autrui ;
- ressentir de la détresse en étant témoin de la souffrance d'autrui ;
- et éprouver des sentiments face à la souffrance d'autrui.

Mise en place d'une situation empathique

Une situation empathique comprend un observateur, qui est une personne qui répond émotionnellement à l'état affectif d'autrui, appelé la cible. Cette cible peut exprimer un état émotionnel ou elle peut se trouver dans une situation perçue comme émotionnelle par l'observateur. De plus, une situation empathique implique qu'il y ait un événement qui se produit et dont l'observateur est témoin directement ou indirectement. De cet événement, il résulte une émotion ressentie par la cible ou simplement imaginée par l'observateur comme étant ressentie par la cible. C'est à cette émotion que l'observateur va réagir. En effet, pour que l'observateur éprouve une réponse empathique, ses émotions doivent en être affectées. Enfin,

il faut également prendre en compte les facteurs dépendant de la relation entre l'observateur et la cible, pouvant moduler la réponse empathique [Paiva *et al.*, 2017].

Différence entre l'empathie et la sympathie

Au cours de nos recherches, nous avons constaté que les chercheurs sont partagés sur les limites entre l'empathie et la sympathie. Afin d'éviter cette confusion, Wispé [1986] indique que l'objet de l'empathie est la compréhension d'autrui alors que l'objet de la sympathie est le bien-être de l'autre. Dans l'ouvrage de Berthoz et Jorland [2004], Jorland indique que la sympathie n'implique pas de se mettre à la place d'autrui. Il est possible d'être empathique sans éprouver de la sympathie pour autrui, et il est possible d'être sympathique sans être empathique. Enfin, dans le même ouvrage, Decety définit l'empathie comme une forme d'identification avec autrui et indique que la sympathie implique une relation plus détachée, l'identification n'est pas nécessaire. La sympathie a des fins altruistes et suppose l'existence ou l'établissement d'un lien affectif avec autrui, c'est également le cas de la compassion qui implique un sentiment de bienveillance. Alors que l'empathie n'a pas pour but la création d'un lien affectif, mais vise plutôt à la compréhension d'autrui notamment en faisant appel à l'imagination ou aux expériences personnelles [Pacherie, 2004].

En conclusion et dans le cadre de nos travaux de recherche, nous retiendrons la définition suivante : l'empathie se définit comme étant la compréhension de l'état émotionnel d'autrui (composante cognitive) et comme une réponse affective appropriée à la situation d'autrui (composante affective). Ces composantes de l'empathie sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

Composante affective de l'empathie

L'empathie affective, également nommée empathie émotionnelle, correspond à une approche neurologique et désigne les réponses affectives face aux réactions émotionnelles d'autrui. Elle joue un rôle important dans les interactions sociales, notamment pour établir des relations [Favre *et al.*, 2009]. Il semble que nous réagissions de cette manière dans le but d'améliorer le lien qui nous unit. La perception de l'état émotionnel d'autrui active automatiquement chez l'observateur une représentation de cet état, tel un système de résonance permettant de comprendre ce que fait ou ressent autrui [Narme *et al.*, 2010]. Cette résonance affective signifie que l'individu imite et synchronise ses expressions faciales ainsi que sa posture en fonction de celles des autres. L'empathie affective s'articule autour de l'imitation et de la contagion émotionnelle.

L'imitation ou le mimétisme émotionnel signifie que l'individu reproduit les mêmes expressions émotionnelles que la personne qu'il observe ou avec laquelle il échange [Hess et Fischer, 2014]. La tendance à imiter, relative à l'empathie [Iacoboni, 2009], consiste à réagir émotionnellement aux expressions faciales d'autrui [MacDonald, 2003; Rymarczyk *et al.*, 2016]. Une étude de Dimberg *et al.* [2000] a d'ailleurs révélé que lorsque les individus sont exposés aux expressions faciales d'autrui, ils réagissent spontanément avec des réponses émotionnelles, reflétant notre tendance à imiter les stimuli faciaux observés chez les autres. Dans ce sens, Meltzoff et Decety [2003] définissent trois phases de développement de l'empathie chez l'enfant qui commence par l'imitation et qui aboutissent à l'empathie. Durant la première phase, les nourrissons imitent les adultes, ils établissent des connexions entre leurs propres actions et celles qu'ils observent des autres. La deuxième phase concerne le fait que les nourrissons utilisent la proprioception, c'est-à-dire la capacité à ressentir le mouvement des muscles, pour associer certaines expressions faciales à des émotions. Enfin, la troisième étape, correspondant à l'empathie, se produit lorsque les enfants remarquent que d'autres personnes font les mêmes expressions qu'eux. Ils se projettent et déduisent que les autres doivent ressentir la même chose en effectuant cette expression.

La contagion émotionnelle signifie que l'individu est influencé par les émotions d'autrui. Rizzolatti et Sinigaglia [2008] ont observé que lorsqu'un individu effectuait une action ou lorsqu'il observait quelqu'un effectuer la même action, les mêmes neurones s'activaient, d'où leur nom de « neurones miroirs ». Il existe le même mécanisme miroir permettant la compréhension émotionnelle. L'activation cérébrale liée à notre propre état émotionnel et celle liée à l'observation d'autrui vivant la même expérience activent donc les mêmes zones cérébrales [Wicker *et al.*, 2003]. Ces neurones jouent un rôle dans les capacités cognitives des individus, telles que l'empathie mais également concernant l'apprentissage par imitation. Ce système de neurones miroirs est également présent dans la perception de la douleur : une étude a par exemple démontré que les mêmes zones du cerveau s'activent lorsqu'une femme ressent de la douleur ou lorsqu'elle voit son conjoint avoir mal [Singer *et al.*, 2004]. Cela signifie que lorsque nous percevons un individu souffrir, nous percevons en partie sa souffrance. D'ailleurs, dès les premières heures de la vie d'un nouveau-né, il réagit empathiquement à la détresse des autres nourrissons, il est affecté par les pleurs des autres bébés [Sagi et Hoffman, 1976].

Selon De Vignemont et Singer [2006], il y a de l'empathie affective seulement s'il y a un état affectif, si cet état est en lien avec l'état affectif d'autrui, si cet état est induit grâce à l'observation et l'imagination de l'état affectif de l'autre, et si nous sommes conscients qu'autrui est la source de notre propre état affectif. Enfin, ils soulignent que nous ne sommes pas constamment en empathie bien que ce soit un phénomène automatique. Si tel était le

cas, cela se traduirait par des troubles émotionnels constants. De Vignemont et Singer [2006] indiquent également qu'il existe des facteurs de **modulation de l'empathie** dépendant des caractéristiques de l'émotion observée (valence, intensité, émotion primaire ou secondaire), de la relation entre l'observateur et autrui, du contexte et des caractéristiques de l'individu, tel que son humeur, son âge, son répertoire émotionnel, etc. (Tableau 2.1). En ce qui concerne les caractéristiques des émotions, De Vignemont et Singer [2006] renseignent par exemple qu'il serait plus facile de faire preuve d'empathie face à des émotions primaires telles que la peur ou la joie, par rapport à des émotions secondaires telles que la jalousie. Concernant les facteurs de modulation liés à l'observateur, ils donnent également l'exemple d'une personne ne souffrant pas de la peur du vide, qui pourra difficilement s'identifier à une cible effrayée par le vide, car cela n'est pas dans son répertoire émotionnel, elle ne l'a jamais ressentie et ne connaît donc pas cette peur.

Davis [1994] évoque également des facteurs de modulation concernant la situation et l'observateur. Pour l'observateur, ce sont les différences individuelles, l'histoire personnelle et les capacités biologiques qui peuvent moduler les réponses empathiques. Concernant la situation, cela dépend de la durée de l'échange et de la similarité entre l'observateur et la cible d'empathie. Ortony *et al.* [1988] introduisent également des variables qui influencent l'intensité des réponses émotionnelles. La désirabilité ou l'indésirabilité d'un événement peut affecter l'évaluation de l'utilisateur et influencer ses réponses empathiques. Par exemple, l'observateur va juger si la cible mérite ou non l'événement qui l'affecte, en conséquence, il est heureux ou désolé pour cette cible en fonction de l'événement.

TABLEAU 2.1 – Facteurs de modulation de l'empathie [De Vignemont et Singer, 2006]

Caractéristiques des émotions	Relation entre l'observateur et la cible	Contexte/Situation	Observateur
Valence	Lien affectif et bienveillance	Évaluation de la situation	Humeur
Intensité	Implication personnelle (ex : jalousie, colère)	Présence de multiples émotions	Personnalité, genre et âge
Saillance	Familiarité et similarité		Répertoire émotionnel
Émotions primaires vs émotions secondaires	Intentions communicationnelles		Capacité de régulation émotionnelle

Concernant l'impact de la différence des sexes sur les réponses empathiques, il semble que les femmes soient plus empathiques que les hommes [Baron-Cohen et Wheelwright, 2004]. Toutefois cela reste controversé, Lennon et Eisenberg [1987] indiquent que ce fait est un stéréotype, lié à la société et au rôle traditionnel de la femme. Concernant la personnalité,

les personnes qui obtiennent de bons résultats en matière de responsabilité sociale ont également de bons résultats en matière d'altruisme et d'empathie [Aziz et Abid, 2018; Paiva *et al.*, 2017]. Cette responsabilité sociale est affiliée à une obligation morale de répondre aux attentes des autres à l'égard de son comportement. Elle est considérée comme un trait de personnalité important [Paiva *et al.*, 2017]. Enfin, d'après l'étude de Bensalah *et al.* [2016] effectuée auprès d'enfants, l'empathie affective n'évolue pas avec l'âge au cours de l'enfance et de l'adolescence, par contre les niveaux d'empathie cognitive semblent augmenter avec l'âge durant ces périodes.

En conclusion, l'empathie affective est un phénomène inconscient. Elle est liée à l'imitation et à la contagion émotionnelle [Guillain et Pry, 2012], elles-mêmes basées sur la reconnaissance de l'état émotionnel d'autrui. Les humains possèdent un système de neurones permettant la compréhension des actions et des émotions d'autrui, afin d'adapter leurs réponses affectives.

Composante cognitive de l'empathie

La composante cognitive de l'empathie correspond à une approche psychologique de l'empathie. Contrairement à l'empathie affective, cette projection n'est pas automatique mais contrôlée. Comme évoquée précédemment, elle correspond à la compréhension de l'état émotionnel d'autrui [Omdahl, 1995]. Cela consiste à se mettre à la place de l'autre et à comprendre une situation de la même façon que lui.

Ainsi, l'empathie cognitive permet d'adopter **la perspective d'autrui** [Narme *et al.*, 2010], c'est-à-dire se projeter, se mettre spontanément à la place d'autrui, tout en différenciant les émotions d'autrui sans confusion avec ses propres émotions [Decety, 2002]. Rogers définit l'empathie en prenant également en compte cette différenciation avec autrui : « L'état d'empathie ou d'être empathique, consiste à percevoir le cadre de référence interne d'autrui aussi précisément que possible et avec les composantes émotionnelles et les significations qui lui appartiennent comme si l'on était cette personne, mais sans jamais perdre la condition du « comme si » [Rogers, 1959, 1975]. La prise de perspective est souvent définie comme une tendance à adopter le point de vue psychologique d'autrui. Elle est liée à **la théorie de l'esprit** c'est-à-dire la capacité à comprendre et prédire le comportement et les émotions d'autrui en se basant sur ses connaissances, ses intentions, ses désirs, ses croyances, etc. Cela correspond à la capacité de reconnaître notre propre état mental, mais également celui d'un autre individu. L'empathie cognitive, et notamment la théorie de l'esprit sont importantes pour garantir de bonnes interactions humaines car la capacité de compréhension des états mentaux d'autrui est un aspect essentiel de l'intelligence sociale [Frith et Frith, 1999, 2005]. De plus, Reniers *et al.* [2011] évoquent la notion de **simulation** lorsqu'ils définissent l'empa-

thie cognitive. Cette simulation mentale correspond à une projection de soi à la place d'autrui par l'imagination. Cela nécessite de se mettre à la place d'autrui en imaginant ce qu'il ressent et les actions futures qu'il pourrait entreprendre. L'observateur qui éprouve de l'empathie en se mettant, plus ou moins volontairement, à la place de l'autre, est conscient que ses émotions sont plus ou moins semblables, mais pas identiques à ce que ressent autrui. Decety parle alors d'une simulation mentale de la perspective subjective d'autrui [Berthoz et Jorland, 2004]. Ainsi, l'empathie cognitive comprend une sorte de régulation émotionnelle. Cela signifie que nous partageons les émotions des autres, mais sans les subir. Il est possible de percevoir la colère d'une personne et de se mettre à sa place, sans pour autant se mettre dans le même état émotionnel. La réponse empathique peut également être modérée en fonction de la relation existante entre l'individu et la cible. Plusieurs facteurs influencent cette empathie, Hoffman [2001] liste les biais liés à cette relation : le biais intra-groupe, le biais d'amitié, le biais de similarité ainsi que le biais de savoir-faire. L'individu a des liens plus forts avec sa famille, ses amis, ou des personnes possédant des intérêts et des préoccupations similaires, ses réactions empathiques en seront donc influencées.

Enfin, Hoffman [2001] indique que l'empathie se définit en cinq concepts pour aboutir à une réponse empathique. Il existe divers modes afin que l'individu puisse s'y référer et les combiner, quelle que soit la nature de la situation. Les trois premiers modes sont involontaires et automatiques, relatifs à la composante affective. Les deux autres modes demandent un traitement cognitif plus important, composante cognitive de l'empathie. Le premier mode, le mimétisme, se définit avec l'imitation puis la rétroaction, suscitant des sentiments similaires à ceux de la personne observée. Le second mode est le conditionnement classique. L'individu assimile des signaux émotionnels, tels que des expressions faciales. Lorsqu'il les observe chez autrui, il est capable de reconnaître ces signaux et d'avoir une réponse appropriée et compatible à la situation d'autrui. L'association directe est le troisième mode. C'est une variable du conditionnement classique, mais il y a une nécessité à avoir une expérience antérieure semblable à l'émotion d'autrui. Les signaux émotionnels d'autrui rappellent des expériences passées similaires à l'observateur. Le quatrième mode correspond à l'association médiatisée. Hoffman indique que c'est une médiation verbale. L'état émotionnel est communiqué à travers le langage. Le langage suscite chez l'observateur une réponse émotionnelle en adéquation avec la situation décrite verbalement par un autre individu. Hoffman précise que la médiation verbale évoque une réponse empathique chez l'observateur même en l'absence de la cible. Enfin, le cinquième mode, la prise de perspective est la capacité de l'individu à imaginer ce qu'il ressentirait dans la situation d'autrui (concentration sur soi-même) ou ce que ressentirait quelqu'un qui lui ressemble dans la même situation (concentration sur autrui). Cette prise

de perspective, aussi appelée prise de rôle, demande un effort cognitif plus important. Elle est souvent délibérée, mais peut être spontanée. Higgins [1981] fait également une distinction entre la prise de rôle qui peut être situationnelle, lorsque l'observateur évalue la situation en se mettant à la place d'autrui, en utilisant les mêmes mécanismes d'évaluation que s'il était lui-même dans cette situation, ou individuelle, quand l'observateur évalue la situation d'autrui en prenant en compte son point de vue et ses caractéristiques.

Lien entre l'empathie et les expressions faciales émotionnelles

Il a été démontré qu'il existe un lien entre les expressions faciales, la reconnaissance des émotions et l'empathie [Besel et Yuille, 2010; Dimberg *et al.*, 2000; Drimalla *et al.*, 2019; MacDonald, 2003]. Une étude a révélé que plus un individu est empathique, meilleures seront ses capacités concernant la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles [Jospe *et al.*, 2018]. Dimberg *et al.* [2000] ont également mis en avant un lien entre l'exposition aux expressions faciales d'autrui et l'activité des muscles faciaux de l'observateur. Leurs recherches ont permis de révéler que les humains étaient prédisposés à réagir spontanément à des stimuli faciaux émotionnels. L'observateur va réagir facialement comme son interlocuteur. Cela va induire chez lui une émotion similaire et provoquer l'empathie. Cette réaction est notable grâce à l'activité des muscles faciaux (électromyographie faciale). Une recherche ultérieure de Dimberg *et al.* a également démontré que plus une personne est empathique, plus elle réagit inconsciemment aux expressions émotionnelles d'autrui [Dimberg *et al.*, 2011].

2.2.2 Empathie et théorie des émotions

Afin de clarifier et d'expliquer les processus d'empathie, les principales théories des émotions vont être présentées dans cette section. Puis, nous détaillerons l'expression ainsi que la reconnaissance des émotions sur les humains, notions impliquées dans l'induction d'empathie.

Les grandes théories des émotions

Charles Darwin a décrit les aspects innés, universaux et fonctionnels des expressions émotionnelles. Il considèrait qu'elles étaient héritées de nos ancêtres et ont évolué à des fins d'adaptation. Cette approche est dite évolutionniste et adaptative [Darwin, 1877]. Suite à ces observations des expressions faciales et corporelles, Darwin compose une première classification des émotions. Ces travaux ont inspiré beaucoup de chercheurs et ont permis la naissance de nouvelles théories des chercheurs néodarwiniens, tels que Tomkins, Izard, Plutchik, Ekman ou Russell. Les grandes théories des émotions sont brièvement présentées ci-dessous :

- Approche catégorielle des émotions

Basée sur la perspective évolutionniste de Darwin, cette approche étudie les émotions en les classant sous forme de catégories, distinguant les émotions de base et les émotions complexes.

Tomkins soutient que l'affect est le résultat d'un ensemble de réactions : faciales, musculaires et viscérales. Lorsque les muscles faciaux sont contractés et qu'il y a des réactions corporelles, ils envoient un message au cerveau afin qu'il interprète cette émotion comme étant ressentie. Ces réflexions sont à l'origine de la théorie de la rétroaction. Tomkins indique que les réponses faciales jouent un rôle déterminant dans l'induction même de l'émotion [Christophe, 1998]. Dans la continuité de Tomkins, Izard [2007] mène des recherches sur les émotions de base et leur rôle dans le développement et fonctionnement humain. Il suppose que les émotions motivent et organisent l'ensemble de nos réactions, en se basant sur nos expériences émotionnelles précédentes, afin de permettre l'adaptation des humains. Il insiste sur leur rôle dans le développement de relations, de liens et de communications entre humains. Ses recherches concernent la théorie différentielle des émotions.

Plutchik a quant à lui une vision fonctionnelle des émotions, qui implique que l'individu évalue les aspects favorables ou défavorables de son environnement et interagit avec ce dernier. Cette théorie est dite psycho-évolutionniste. Selon Plutchik, il existe huit émotions fondamentales, relatives à des fonctions adaptatives. La peur a une fonction de protection, la colère de destruction, la joie de reproduction, la tristesse de réintégration, l'acceptation

d'incorporation, le dégoût de rejet, l'espérance d'exploration, et la surprise d'orientation. Il propose un modèle multidimensionnel des émotions, reliées selon trois dimensions : l'intensité (ex : la colère et la rage), leur degré de similitude et enfin leur polarité (ex : la joie opposée à la tristesse) [Plutchik, 2001].

Enfin, Ekman affirme qu'il existe six émotions de base et que celles-ci sont caractérisées par des réactions biologiques et innées (Figure 2.1). Ces travaux correspondent à la théorie des émotions de base, qui sont la joie, la peur, le dégoût, la colère, la tristesse et la surprise. Selon Ekman, ces émotions ont des caractéristiques communes : elles possèdent un signal universel distinct, elles sont présentes chez d'autres primates, ce sont des réactions physiologiques. Les émotions de base sont associées à des déclencheurs universels. Elles apparaissent spontanément et rapidement, et sont de courte durée. Ce sont des réponses émotionnelles qui sont comprises et évaluées automatiquement [Ekman, 2007].



FIGURE 2.1 – Expression des émotions de base [Ekman et Friesen, 2003]

- Approche dimensionnelle

Cette approche ne classe pas les émotions sous forme de catégories mais le long d'un axe continu selon différents degrés. Tout en se basant sur les émotions de base d'Ekman, Russell introduit un modèle graphique de l'émotion (*Circumplex Model of Affect*). Les émotions sont réparties selon deux axes : la valence et l'activation de l'émotion. La valence permet de classer les émotions en fonction de leur caractère plaisant ou déplaisant. Chaque émotion peut être décrite grâce à ces deux axes : par exemple la joie est une émotion active, et plaisante contrairement à l'ennui qui a un faible niveau d'excitation et qui n'est pas plaisant.

- Approche cognitive

D'après ces théories, les aspects d'une situation vont être évalués afin de générer un état émotionnel. Selon Lazarus et Folkman [1984], il y a deux sortes d'évaluation d'un événement. L'évaluation primaire détermine et évalue la pertinence de l'émotion que nous ressentons face à un événement. L'évaluation secondaire concerne notre capacité à maîtriser les conséquences de cet événement. La théorie cognitive proposée par Scherer *et al.* [2001] détaille les étapes du processus cognitif à travers une liste de plusieurs critères d'évaluation d'un événement. Dans son modèle *Component Process Model*, Scherer propose la classification d'un ensemble de critères d'évaluation en quatre groupes : la pertinence de l'événement pour l'individu, l'implication et le rapport aux buts, le potentiel de maîtrise et l'accord avec les standards. Le résultat de l'évaluation de ces différents critères permet de définir des prédictions concernant les réactions physiologiques et émotionnelles des individus.

Selon Frijda [1986], les émotions ont une fonction adaptative et préparent à interagir avec notre environnement dans un but de survie ou de bien-être. Cela implique de se préparer à une attitude (par exemple : le rejet) envers l'élément déclencheur de l'émotion et d'adopter cette attitude en effectuant une action (par exemple : s'éloigner de cet élément déclencheur). Frijda a déterminé huit tendances à l'action innée pour la réalisation des intérêts, telles que l'agression (activée en cas de colère par exemple), l'approche, la panique, le jeu, l'inhibition, le rejet, la soumission et la dominance.

Enfin, selon le modèle de Ortony, Clore et Collins (modèle OCC), la situation est évaluée différemment selon si elle est causée par un événement, un objet ou encore une action [Ortony *et al.*, 1988]. Les chercheurs ont défini et associé 22 émotions selon les conditions qui les ont déclenchées. Pour cela, il existe trois variables : les objectifs de l'individu, les normes et les standards de l'individu, et l'attractivité. Cela permet de déterminer l'influence de ces variables sur l'évaluation des événements aboutissant à la génération de l'état émotionnel.

Nous avons abordé ces différentes théories des émotions car de nombreuses recherches sur la représentation des émotions ainsi que sur l'empathie sont basées sur ces théories. Nous allons à présent décrire l'expression des émotions d'un individu au travers de son comportement.

Expression et reconnaissance des émotions

L'expression et la reconnaissance des émotions au travers du comportement humain sont des notions essentielles pour ressentir de l'empathie.

- Le comportement verbal et non-verbal :

L'étude de Noël *et al.* [2016] indique qu'un individu traite en priorité les informations émanant des expressions faciales émotionnelles, toutefois il prend également en compte les expressions vocales, ainsi que des changements tels que la respiration, la phonation et l'articulation [Scherer, 2003]. La modification du ton employé est appelée la prosodie émotionnelle. Lorsqu'un individu ressent de la colère, cela s'entend à son timbre de voix et à son intonation, et cela même sans porter attention à ses propos. La prosodie varie donc en fonction de l'émotion de l'individu [Bänziger *et al.*, 2001]. Chaque émotion peut être définie avec des expressions faciales et vocales [Ekman, 1993; Scherer, 2003]. Néanmoins, Mehrabian [1969] indique que le canal visuel contribue plus au décodage des émotions d'autrui que l'auditif.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons sur le comportement non-verbal, c'est pourquoi nous ne détaillerons pas les comportements liés au comportement verbal, malgré leur importance concernant l'expression et la reconnaissance des émotions.

Une émotion peut être déclenchée par un stimulus interne tel qu'un souvenir, ou externe, c'est-à-dire se trouvant dans l'environnement. Les émotions de l'individu affectent son comportement et ses mouvements, cela a notamment été révélé par une étude de Roether *et al.* [2009] démontrant l'existence de mouvements et de postures spécifiques à chaque émotion. Prenons l'exemple d'un individu effrayé, son expression faciale reflétera la peur, sa respiration va changer, son corps va réagir et sa posture va se rigidifier. La posture est liée au contexte émotionnel et a des conséquences sur nos mouvements. Ces réponses semblent être liées à la préparation à l'action [Lelard, 2017]. Par ailleurs, une autre étude de Stepper et Strack [1993] a démontré le caractère réflexif de la relation entre l'émotion et la posture, l'état émotionnel varie également en fonction de la posture.

Il existe des effets de rétroaction concernant le comportement non-verbal. Parmi les études sur la rétroaction, celle de Strack *et al.* [1988] démontre que les muscles contractés et impliqués dans les expressions faciales peuvent rendre les émotions encore plus intenses. La rétroaction de la respiration influence également notre état émotionnel, cela a notamment été démontré dans l'étude de Philippot *et al.* [2002], qui met en exergue qu'il existe une corrélation entre la respiration et une émotion spécifique (joie, peur, tristesse, colère). Les mouvements de tête et des mains ont également été inclus dans l'identification de certaines émotions. Bien qu'ils ne permettent pas à eux seuls de communiquer une émotion, ils participent à sa reconnaissance [Ekman, 1993]. Les émotions peuvent donc induire des changements de posture, d'expressions faciales ainsi que des changements physiologiques par rapport à un état dit neutre. Ces changements sont des préparations du corps. Par exemple pour la peur, notre rythme cardiaque s'accélère afin de se préparer à un déplacement soudain, le flux sanguin augmente vers les

jambes pour fuir [Ekman, 2007]. Ainsi, le comportement non-verbal d'un humain fournit des informations sur son état émotionnel.

- Nature et fonction des expressions faciales :

Dans le cadre de nos travaux, nous nous focalisons sur le comportement non-verbal et plus précisément sur l'expressivité faciale. Les expressions faciales sont utilisées au quotidien pour exprimer et transmettre les émotions ainsi que pour identifier celles d'autrui. Tel qu'évoqué dans les théories des émotions, l'expression et la reconnaissance ont un but de survie, de reproduction ainsi que d'adaptabilité sociale.

Ekman [2007] a démontré que les expressions faciales des émotions de base étaient universelles, bien que cette universalité soit à présent une affirmation controversée [Jack *et al.*, 2009]. Ekman [2007] indique que pour chacune des émotions de base, il existe une expression faciale innée. Les émotions secondaires, aussi appelées complexes, sont considérées comme issues de mélanges d'émotions de base. Elles dépendraient davantage des normes culturelles. Leur reconnaissance suppose donc un apprentissage [Pacherie, 2004].

Ekman et Friesen [1978] ont proposé une description des mouvements musculaires faciaux permettant de classifier toutes les expressions faciales émotionnelles. Cette méthode, intitulée le *Facial Action Coding System* (FACS), est l'une des plus utilisées pour décrire les expressions. Cette méthode est basée sur une analyse anatomique des muscles faciaux. Chaque expression est définie grâce à une combinaison de plusieurs muscles faciaux numérotés, appelés Unité d'Action (*Action Unit*, *AU*). Les unités d'action correspondent à la contraction d'un ou plusieurs muscles faciaux. Par exemple, le muscle « Zygomatic Major » correspond à l'AU 12. L'intensité des contractions musculaires peut être décrite avec des lettres : A trace, B léger, C prononcé, D sévère et E maximum. À titre d'exemple, AU 1B signifie Unité d'Action 1 (Frontalis pars medialis) B (Léger). L'intensité permet également de différencier les émotions. Par exemple, l'ouverture de la bouche est utilisée dans l'expression faciale de la colère et du dégoût. C'est notamment leur intensité qui aide à les distinguer [Ekman, 1999]. Enfin, l'asymétrie se note R (droit) ou L (gauche). Par exemple, R signifie que le mouvement est présent seulement à droite.

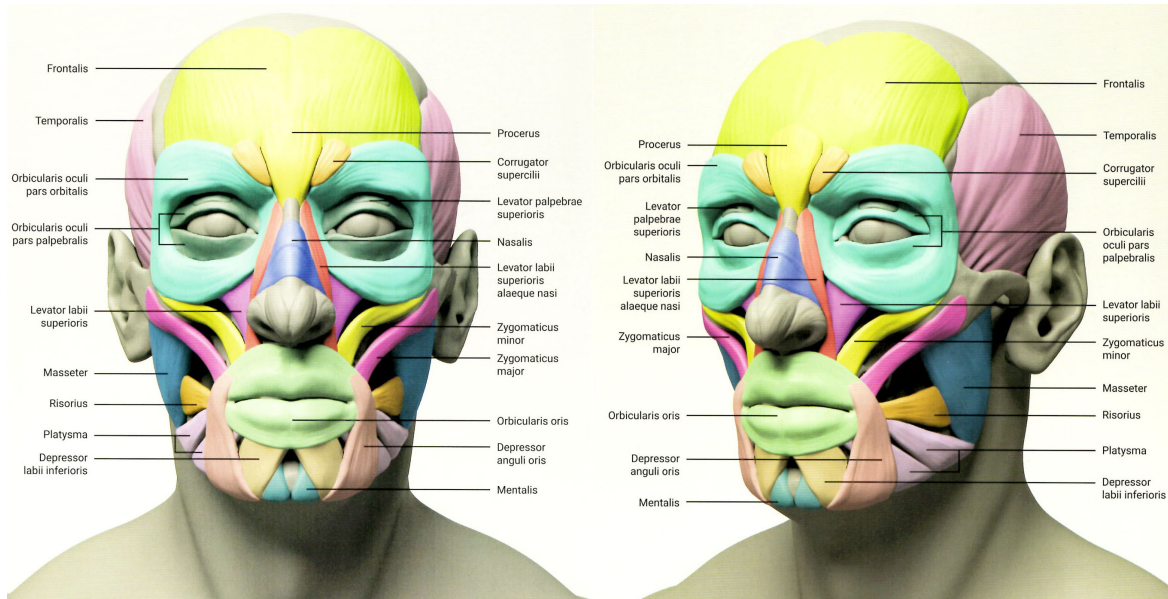


FIGURE 2.2 – Représentation anatomique des muscles faciaux - *The Artist's Guide to the Anatomy of the Human Head : Defining Structure and Capturing Emotions* [3D Total Publishing, 2017]

Il existe plus de quarante AUs différentes au niveau du visage, ainsi que quelques AUs plus spécifiques concernant le mouvement de la tête et le mouvement des yeux. Ces diverses Unités d'Action nous permettent de réaliser plus de 10 000 expressions faciales différentes [Ekman, 2007]. Grâce au FACS, les expressions faciales des émotions de base peuvent être définies à l'aide des unités d'actions (Figure 2.3), (se référer à *What the face Reveals*, p.14 pour le détail des Unités d'Action [Ekman et Rosenberg, 1997]).

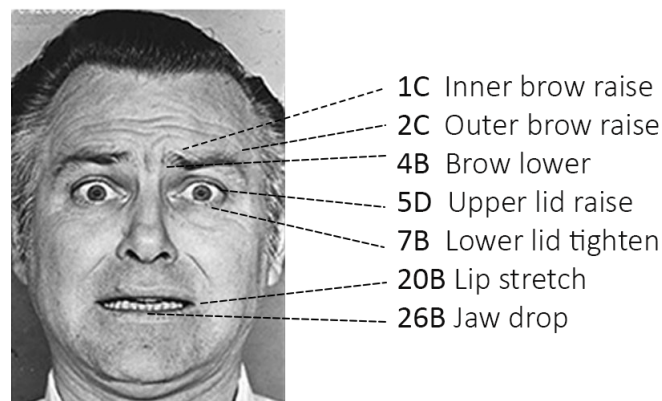


FIGURE 2.3 – Description des Unités d'Actions pour une expression de peur [Ekman et Friesen, 2003]

Dans sa publication, *Facial expression and emotion*, Ekman [1993] affirme qu'il n'existe pas seulement une expression pour chaque émotion. Il indique, par exemple, avoir répertorié plus de soixante expressions de colère [Ekman, 2007].

Néanmoins, le FACS connaît certaines limites, les principales étant la variabilité inter-individuelle, c'est-à-dire que cela dépend des différences d'évaluation subsistant entre les

individus, ainsi que la variabilité du sens d'une expression en fonction du contexte.

Une expression peut être décrite grâce à trois phases temporelles. La première phase est l'*onset* qui représente le temps d'apparition de l'expression faciale, ensuite il y a l'*apex*, qui est le temps de maintien de l'expression, puis la dernière phase est l'*offset* c'est-à-dire le temps de disparition de l'expression faciale [Bailly et Pelachaud, 2009; Wu *et al.*, 2014].



FIGURE 2.4 – Les phases temporelles d'une des expressions faciales de la joie [Wu *et al.*, 2014]

Un individu est capable de reconnaître un visage, d'identifier une personne et de reconnaître des expressions faciales rapidement. Il existe deux types d'analyses de visage effectués par le cerveau. La première est une reconnaissance globale du visage. La seconde se base sur une reconnaissance par composante (nez, yeux et bouche), en effet l'étude de Khan *et al.* [2012] révèle que pour la reconnaissance d'une expression de joie ou de peur par exemple, l'attention visuelle se porte essentiellement sur la région buccale (Tableau 2.2).

TABLEAU 2.2 – Synthèse des régions faciales les plus déterminantes pour la reconnaissance des six émotions de base [Khan *et al.*, 2012]

Expression	Régions faciales
Joie	Région buccale
Surprise	Région buccale
Tristesse	Région buccale et oculaire
Dégoût	Région nasale, buccale et oculaire
Peur	Région buccale et oculaire
Colère	Région buccale, oculaire et nasale

En complément des mouvements musculaires faciaux, il existe divers facteurs faciaux participant à l'expression des émotions tels que la pigmentation de la peau, les rides d'expression, la sudation, la durée des expressions, la variation de la taille des pupilles, le regard, etc.

Concernant les rides, il en existe deux sortes : les rides permanentes appelées rides statiques. Elles sont souvent liées à l'âge et sont fixes, dans le sens où elles ne se modifient pas en fonction des mouvements ou des états émotionnels de l'humain. Il existe également des

rides dynamiques, telles que les rides d'expression qui sont liées aux réactions émotionnelles. Ce sont des déformations de la peau dues à la contraction d'un muscle [Cani *et al.*, 2009; Larboulette et Cani, 2004; Wu *et al.*, 1996].

Le regard ainsi que la variation du diamètre pupillaire sont également des facteurs d'expressivité chez l'humain [Hess, 1975]. La taille des pupilles sur un humain peut varier de 1,5 mm jusqu'à 9 mm. Toutefois, en condition standard de luminosité, les pupilles font en moyenne 3 mm [Sirois et Brisson, 2014]. Les pupilles réagissent donc aux variations de luminosité afin d'optimiser la vision, ainsi qu'aux stimuli émotionnels [Partala et Surakka, 2003], c'est pourquoi il ne faut pas confondre réflexe pupillaire et processus cognitif. L'étude du changement de diamètre des pupilles en fonction d'un stimulus émotionnel est appelée la pupillométrie [Sirois et Brisson, 2014]. La pupillométrie est une mesure stable et fiable des réponses des participants, elle permet par exemple de percevoir l'excitation des participants au travers de la dilatation des pupilles [Bradley *et al.*, 2008]. La variation des pupilles a un rôle important pour les interactions entre humains, pour la perception d'autrui et de son état émotionnel [Alghowinem *et al.*, 2014; Demos *et al.*, 2008; Hess, 1975; Kret, 2018]. Le diamètre des pupilles varie donc en fonction des états émotionnels. Elles se contractent pour l'émotion de dégoût, dans le but de bloquer la lumière afin d'accentuer la concentration et identifier la source du dégoût [Lee et Anderson, 2017]. Elles se contractent aussi pour la colère [Hess, 1975] et la tristesse [Harrison *et al.*, 2007]. A contrario, elles se dilatent pour la joie [Hess, 1975], la surprise [Kloosterman *et al.*, 2015], ainsi que la peur par nécessité d'élargir nos champs de vision afin de localiser le danger [Lee et Anderson, 2017; Leuchs *et al.*, 2017].

Enfin, en plus des facteurs visuels tels que les expressions faciales, il existe divers facteurs impliqués dans les réactions émotionnelles des individus, régulées par leur système nerveux et endocrinien. Dans la sous-section suivante, nous détaillons les différents moyens existants pour mesurer ces réactions émotionnelles et empathiques.

2.2.3 Mesure des réactions émotionnelles et empathiques

Il n'existe pas une façon de mesurer les émotions d'un individu, mais plusieurs changements mesurables et observables à prendre en compte [Mauss et Robinson, 2009]. Il est répertorié trois composantes permettant une évaluation de l'état émotionnel de l'utilisateur : subjective, comportementale et physiologique [Lallemand et Gronier, 2015]. La composante subjective est réalisée sur la base de l'auto-évaluation, notamment grâce à des questionnaires. Il existe deux types de mesure de l'état émotionnel, la mesure des dimensions émotionnelles, qui peuvent être définies par le plaisir, l'activation et la dominance ; et la mesure des émotions discrètes, le sujet doit évaluer le degré correspondant à ces émotions, c'est le cas par exemple de l'échelle PANAS (*Positive Affect and Negative Affect Schedule*) de Watson *et al.* [1988].

La composante expressive et comportementale signifie qu'il est possible d'observer et de reconnaître les émotions d'un individu grâce à une analyse comportementale. Celle-ci peut être effectuée à partir d'un enregistrement de données comportementales d'un utilisateur, telles que ses expressions faciales émotionnelles, ses mouvements, sa posture, l'intonation dans sa voix, la distance, ou encore l'attitude vis-à-vis d'autrui, etc. De fait, il est possible d'avoir recours à la captation des expressions faciales de l'utilisateur. Ces systèmes de captation et de reconnaissance d'émotions sont en général composés des trois étapes : la détection et le suivi de visage, l'extraction de caractéristiques et enfin la classification. Lors de la captation, des zones du visage de l'utilisateur sont reconnues telles que la position des sourcils, du nez et de la bouche, pour définir le placement de points de tracking. Ensuite, ces points d'ancrage vont permettre de déterminer quels muscles sont en mouvement et donc de reconnaître les émotions de l'utilisateur. Il existe plusieurs techniques basées sur différentes solutions de codage des expressions faciales. Les logiciels de reconnaissance d'émotions classent, en général, les expressions faciales en fonction des émotions de base ou des valences (positives, négatives).

La dernière composante est l'analyse de signaux physiologiques permettant d'évaluer les réactions de l'utilisateur [Neumann et Westbury, 2011; Picard *et al.*, 2001]. Concernant les mesures physiologiques, il existe divers moyens permettant d'observer les réactions des individus, régulées par leur système nerveux et endocrinien. Il est envisageable d'analyser les actions du système cardiovasculaire (rythme cardiaque, pression sanguine et artérielle), du système respiratoire (rythme respiratoire, le volume respiratoire), du système excréteur (glandes salivaires, sudation), du système musculaire et du système immunitaire, etc.

Afin de mesurer ces signaux, il est possible d'utiliser diverses méthodes quantitatives objectives que nous détaillons ci-dessous. Il est également indiqué leur rapport à la mesure de l'empathie [Neumann et Westbury, 2011] :

- la neuro-imagerie et électroencéphalographie (fMRI, EEG) : mesures de l'activité cérébrale et de l'activité électrique corticale. Cela permet notamment de déterminer quelles zones du cerveau sont impliquées dans l'empathie.
- l'électromyographie (EMG) faciale : enregistrement de l'activité électrique musculaire faciale permettant la prise en compte des expressions faciales liées aux émotions. L'EMG faciale peut fournir des informations relatives à la compréhension des expressions d'autrui et au mimétisme (empathie affective).
- l'électro-oculographie (EOG) : mesure de l'activité électrique oculaire.
- la conductance cutanée : mesure de l'activité électrodermale. Concernant l'induction d'empathie, la conductance cutanée peut participer à déterminer le degré de réactivité émotionnelle ou de l'engagement des utilisateurs face à des stimuli émotionnels.
- la pneumographie : enregistrements des mouvements thoraciques permettant l'analyse de la fréquence et de l'amplitude respiratoire.
- l'électrocardiographie (ECG) : enregistrement de l'activité cardiaque. Neumann et Westbury [2011] précisent que l'activité cardiaque devrait être plus analysée, car l'accélération et décélération de la fréquence cardiaque pourraient donner des informations relatives à l'empathie.

Évaluation de l'empathie chez un individu

Notre revue de la littérature a démontré qu'il existait de nombreuses définitions de l'empathie et des facteurs qui la composent. Il semble qu'il existe tout autant de moyens de mesurer cette empathie, qu'elle soit cognitive, affective ou clinique [Ilgunaite *et al.*, 2017; Neumann *et al.*, 2015].

Nous avons répertorié des questionnaires dédiés à l'analyse de l'empathie cognitive et affective (Tableau 2.3). L'ensemble de ces questionnaires sont des questionnaires d'auto-évaluation :

TABLEAU 2.3 – Synthèse des questionnaires permettant l'auto-évaluation de l'empathie

Intitulés des questionnaires	Empathie cognitive	Empathie affective	Autre
Hogan Empathy Scale [Hogan, 1969]	X		
Interpersonal Reactivity Index [Davis, 1983]	X		
Jefferson scale of Empathy [Hojat <i>et al.</i> , 2011; Hojat <i>et al.</i> , 2001]			Empathie clinique (pour les professionnels de santé, les étudiants en médecine et pour les divers étudiants des professions liées à la santé)
Empathy Quotient [Baron-Cohen et Wheelwright, 2004]	X	X	
Basic Empathy Scale [Jolliffe et Farrington, 2006]	X	X	
Toronto Empathy Questionnaire [Spreng <i>et al.</i> , 2009]	X	X	
Questionnaire of Cognitive and Affective Empathy [Reniers <i>et al.</i> , 2011]	X	X	
Questionnaire Measure of Emotional Empathy [Mehrabian et Epstein, 1972]		X	
Consultation and Relational Empathy [Mercer <i>et al.</i> , 2004]			Empathie clinique (perception de l'empathie par les patients lors de la consultation)
Multidimensional Emotional Empathy Scale [Caruso et Mayer, 1998]		X	
Empathy subscale of the Impulsiveness-Venturesomeness-Empathy Inventory [Eysenck et Eysenck, 1978]	X	X	

Dans le cadre de nos travaux, nous privilégierons l'utilisation du questionnaire QCAE de Reniers *et al.* [2011], car il considère à la fois la composante cognitive et affective et il se base sur d'autres questionnaires reconnus. Ce questionnaire, établi en 2011, se compose de 31 items. Ainsi, les items de 1 à 6 sont basés sur le questionnaire *Interpersonal Reactivity Index* de Davis [1983], les items de 7 à 14 proviennent du questionnaire *Impulsiveness Venturesomeness Empathy Inventory* de Eysenck et Eysenck [1978], ceux de 15 à 29 de *Empathy Quotient* de Baron-Cohen et Wheelwright [2004], enfin les items 30 et 31 trouvent leur origine dans le questionnaire *Hogan Empathy Scale* de Hogan [1969]. Afin d'attester de la fiabilité des résultats obtenus au QCAE, les propriétés psychométriques et la validité de ce questionnaire ont été évalués par Reniers *et al.* [2011]. Ce questionnaire a également été étudié récemment et validé au sein d'études portugaises [Queirós *et al.*, 2018], françaises [Myszkowski *et al.*, 2017] et asiatiques [Liang *et al.*, 2019].

Ainsi, ce questionnaire est composé de 19 items portant sur l'empathie cognitive. Selon Reniers *et al.* [2011], ces derniers sont divisés en deux dimensions :

- la prise de perspective correspond au fait de se mettre intuitivement à la place d'autrui pour adopter son point de vue ;
- la simulation est une tendance à se mettre à la place de l'autre par l'imagination. Cela correspond à une projection de soi à la place d'autrui en imaginant ce qu'il ressent et quelles sont ses intentions futures. Cette projection est possible grâce à une simulation des états mentaux d'autrui afin d'avoir un aperçu de ce qu'il ressent et de ce qu'il ferait.

Les 12 items consacrés à l'empathie affective sont répartis en trois dimensions :

- la contagion émotionnelle qui est le reflet automatique de l'état émotionnel d'autrui ;
- la réactivité proximale correspondant à une réponse émotionnelle à l'observation de l'état émotionnel d'autrui faisant parti d'un contexte social proche ;
- la réactivité périphérique correspondant à une réponse émotionnelle à l'observation de l'état émotionnel d'autrui faisant parti d'un contexte social éloigné.

Les réponses issues de ce questionnaire peuvent être interprétées en se basant sur les deux composantes principales de l'empathie, affective et cognitive, ainsi qu'en se basant sur les cinq facteurs décrits ci-dessus. Toutefois, Myszkowski *et al.* [2017] et Queirós *et al.* [2018] précisent que, bien que la structure à deux facteurs de ce questionnaire est considérée comme acceptable, la structure à cinq facteurs corrélés présente un avantage. De fait, ils recommandent l'utilisation de ce questionnaire en prenant en compte les cinq dimensions.

Enfin, bien que le questionnaire de Reniers *et al.* [2011] permet la collecte de données subjectives sur l'empathie affective et cognitive, la composante affective de l'empathie est également propice à être mesurée avec une approche quantitative objective. En effet, les mesures comportementales et psychophysiologiques, décrites précédemment, fournissent des informations sur les émotions ressenties par l'utilisateur et pourraient permettre l'analyse de la contagion émotionnelle et de l'imitation [Neumann et Westbury, 2011].

Notions-clés de cette section :

- L'empathie se définit comme étant la compréhension de l'état émotionnel d'autrui (composante cognitive) et une réponse affective appropriée à la situation d'autrui (composante affective).
- L'empathie est une notion liée aux émotions et à la reconnaissance des expressions faciales.
- Il existe divers facteurs d'expressivité en complément des mouvements musculaires faciaux tels que les rides d'expression et la taille des pupilles qui varie selon l'état émotionnel.
- L'évaluation des réactions émotionnelles et empathiques de l'utilisateur peut être subjective, comportementale ou physiologique.

2.3 Les agents virtuels

Dans cette partie, nous allons définir le concept d'agent virtuel qui est au centre de nos recherches. Nous évoquerons ensuite les différences avec le concept d'avatar. Dans les deux sections suivantes, nous nous concentrerons sur les notions d'expressivité ainsi que sur le réalisme visuel et comportemental de l'agent. Enfin, nous aborderons l'impact des agents virtuels expressifs sur les interactions humain-machine.

Il existe différents usages au personnage virtuel [Bailenson et Blascovich, 2004; Fuchs *et al.*, 2009]. Il peut désigner :

- un **avatar**, c'est-à-dire une représentation de l'utilisateur intégré au sein d'un environnement virtuel ;
- un **agent virtuel** qui peut être figuratif dans l'environnement ;
- ou un **agent virtuel qui a pour but d'interagir avec l'utilisateur**.

L'agent virtuel correspond à ce qui est appelé généralement un PNJ, c'est-à-dire un personnage non-joueur, dans le monde vidéoludique. Un agent virtuel est une entité autonome, l'utilisateur ne le contrôle pas contrairement à son avatar. Cette entité est contrôlée par l'intermédiaire d'algorithmes qui régissent ses actions et ses comportements.

Bailenson et Blascovich [2004] définissent l'agent virtuel comme une représentation numérique des humains au sein d'un environnement virtuel. Ces humains virtuels sont des entités informatiques dont le comportement est similaire à celui d'un humain réel d'après le point de vue de l'utilisateur [Lhommet, 2012]. Ils peuvent interagir avec l'utilisateur et peuvent s'exprimer à la fois verbalement et non verbalement. Lorsqu'ils sont en capacité d'exprimer des émotions, ils peuvent être qualifiés d'agents virtuels expressifs, aussi appelés agents émotionnels.

Enfin, les agents virtuels peuvent être perçus comme des entités sociales à part entière, auxquelles les utilisateurs sont réceptifs, particulièrement lorsqu'ils sont représentés avec une apparence humaine et dotés de comportements réalistes [Reeves et Nass, 1996]. Il est possible de modifier voire de manipuler certains traits comportementaux de l'humain virtuel afin d'influencer les interactions avec l'utilisateur [Bailenson *et al.*, 2008; Klinger et Viaud-Delmon, 2009]. La crédibilité de l'humain virtuel dépend de l'adéquation entre la situation dans laquelle il se trouve, son état mental (ses buts, ses émotions) et son comportement [Bates, 1994; Lhommet, 2012; Niewiadomski *et al.*, 2010].

2.3.1 Expressivité des agents virtuels

Doter les agents virtuels d'émotions a pour but d'améliorer l'expérience vécue par l'utilisateur, c'est pourquoi nous aborderons tout d'abord la retranscription puis la reconnaissance des émotions sur l'agent, ensuite nous présenterons synthétiquement différents modèles computationnels des émotions.

Retranscription des émotions sur l'agent virtuel

Telle l'expressivité humaine, l'expression des émotions d'un agent virtuel passe par son comportement non-verbal ainsi que son comportement verbal et vocal. Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons sur l'expressivité faciale des agents virtuels. Le visage de l'agent est en effet un élément majeur d'interaction lors d'échanges faisant appel à des réactions affectives [Fabri et Moore, 2005].

D'après Thomas et Johnston, animateurs de Walt Disney, il existe trois points à prendre en compte pour obtenir un personnage expressif [Thomas *et al.*, 1981] :

- l'état émotionnel du personnage doit être défini clairement, afin que l'utilisateur le perçoive facilement ;
- l'état émotionnel affecte le processus de raisonnement du personnage, donc les conséquences de cet état doivent être appropriées et perceptibles dans les actions du personnage ;
- enfin, l'état émotionnel doit être explicitement communiqué à l'utilisateur, c'est pourquoi il est possible d'accentuer voire exagérer les émotions.

De nombreuses recommandations ont été effectuées dans des recherches antérieures concernant l'expressivité des agents virtuels [Ochs *et al.*, 2015; Pelachaud, 2009; Vinayagamoorthy *et al.*, 2006]. Ces recherches ont pour but d'améliorer les interactions avec l'utilisateur. En effet, Bates [1994] souligne l'importance pour des humains virtuels d'être en capacité d'exprimer des émotions notamment pour paraître crédibles et donner l'illusion de la vie. C'est un élément primordial permettant aux utilisateurs de concevoir une relation avec un agent dont il est possible de percevoir les états émotionnels et les intentions.

Il existe diverses approches afin de doter les agents virtuels d'émotions, notamment les approches dimensionnelles, cognitives ou encore catégorielles des émotions (voir Section 2.2.2). Dans le cadre de nos travaux, nous nous basons sur une approche catégorielle en s'appuyant sur des études en psychologie qui ont mis en avant les caractéristiques des expressions faciales émotionnelles [Ekman, 2007].

Afin de permettre la retranscription des émotions sur un agent virtuel, nous devons respecter la contrainte du temps réel¹, qui est adaptée aux travaux sur les interactions humain-machine. Le visage humain est complexe, car il est composé de nombreux muscles, son animation s'avère difficile. Courgeon [2011] regroupe les techniques d'animations faciales en trois catégories distinctes, dont nous verrons qu'elles ne sont pas toutes adaptées aux contraintes du temps réel :

- Animation paramétrique

Elle se base seulement sur un nombre de paramètres réduit afin de retranscrire les émotions de l'agent. Parke [1982] a présenté un modèle 3D dont l'animation était réalisée grâce à une interpolation linéaire des sommets, entre deux positions-clés. Cette méthode est devenue une solution très courante car elle permet de définir dynamiquement les expressions faciales. Il existe deux techniques associées à cette approche : les *blendshapes* (Figure 2.5a)² et le *skinning* (Figure 2.5b)³. Ces techniques nécessitent de se baser sur des références telles que des corpus vidéos afin de retranscrire fidèlement les émotions. Elles dépendent beaucoup des compétences de l'animateur 3D [Bednarski et Pszczoła, 2017].

Les *blendshapes* permettent une interpolation entre deux formes du visage. Cette méthode consiste à posséder plusieurs fois le modèle 3D avec diverses expressions faciales. Les modèles 3D doivent posséder exactement le même maillage, c'est-à-dire le même nombre de polygones. Seuls les sommets (*vertex*) peuvent être déplacés dans l'espace pour créer l'expression. Pour ce type d'animation, le modèle de base est un modèle ayant une expression neutre. L'animation est réalisée par interpolation du modèle neutre et du modèle exprimant une émotion. L'activation des *blendshapes* transforme le visage neutre en un visage expressif.

La technique de *skinning* correspond à une interpolation entre deux configurations de points clé qui serviront de paramètres à la déformation du maillage. Concrètement, la méthode du *skinning* consiste à placer des points-clés sur le visage. Autour de ces points-clés, existe une zone d'influence. Le déplacement de chaque point déplace une zone du visage, tel l'activation d'un muscle influençant l'étirement de notre peau. Ces zones d'influence sont pondérées, cela signifie que plus les *vertex* sont proches du point-clé, plus ils vont être influencés. Au contraire, plus ils sont éloignés, plus l'impact du déplacement du point-clé sera léger.

Il existe deux méthodes de paramétrage facial [Bettadapura, 2012]. La norme MPEG-4 (*Moving Pictures Experts Group*) fournit des paramètres d'animations faciales (FAP) qui permettent de manipuler une expression faciale sur la base de points caractéristiques faciaux [Pandzic et Forchheimer, 2002].

1. Contraintes graphiques liées à une méthode de rendu calculée instantanément permettant l'interactivité.

2. Illustration issue des travaux de Kyle Hefley - <https://www.artstation.com/artwork/J1v0>

3. Illustration issue de Snappers, entreprise spécialisée dans le rigging facial - <https://snapperstech.com/portfolio/snappers-facial-rig-v2-0/>

(a) Animation paramétrique basée sur les *blend-shapes*(b) Animation paramétrique basée sur le *skinning*

FIGURE 2.5 – Techniques associées à l'animation paramétrique

La seconde méthode est l'utilisation des Unités d'Action qui tiennent compte des contraintes anatomiques humaines, basées sur le FACS [Ekman et Friesen, 1978], qui est très utilisé pour la retranscription des émotions sur les humains virtuels notamment avec la méthode de *blend-shapes*.

Cette approche paramétrique nécessite moins de puissance de calcul et une quantité moins importante de données en comparaison des deux approches suivantes.

- Animation par simulation physique

Dans cette approche, l'ensemble du visage est pris en compte, contrairement à l'animation paramétrique qui consiste majoritairement en une simple déformation de la peau en surface. Dans l'animation par simulation physique, l'ossature, la peau et son élasticité, les muscles et les tendons sont potentiellement pris en compte pour concevoir des expressions faciales réalistes [Sifakis *et al.*, 2006]. Cette approche est qualitative cependant la puissance de calcul nécessaire est élevée. Cela complique fortement son utilisation et justifie la faible utilisation de ce type d'animation pour du temps réel.

- Animation par corpus de capture de mouvement

Cette méthode consiste à générer des animations dynamiquement grâce à des outils de technologies avancées permettant la capture des expressions faciales humaines : *motion capture* (Figure 2.6). Le *motion tracking* est également utilisable, c'est une technique visant à exprimer une émotion face à une webcam, cette expression est disposée en temps réel sur l'agent virtuel. Dans ce cas, il est nécessaire d'obtenir une quantité de données élevée. Toutefois, cette technique semble être la plus qualitative en terme de retranscription des émotions et d'animations [Bednarski et Pszczola, 2017].



FIGURE 2.6 – Exemple de *motion capture* de l'acteur Mads Mikkelsen pour le jeu *Death Stranding* - Sony Interactive Entertainment 2019

Enfin, il existe également des approches hybrides combinant différentes caractéristiques de ces approches. Les données issues de capture de mouvement peuvent également être utilisées comme référence, pour extraire les expressions faciales, puis être appliquées et utilisées en se basant sur une autre technique d'animation.

Outre les contractions musculaires permettant les expressions faciales, il existe divers facteurs visuels, tels que la pigmentation de la peau ou encore la sudation, contribuant à la retranscription des émotions sur le visage d'un agent virtuel. Parmi ces facteurs, nous avons notamment répertorié les rides d'expression. L'intégration de ces rides sur un humain virtuel est une étape préconisée, car les rides dynamiques augmentent le réalisme. Comme l'indique Oat : « *Sans même nous en rendre compte, nous dépendons souvent des subtilités de l'expression faciale pour nous donner d'importants indices contextuels sur ce que quelqu'un nous dit.* » (notre traduction) [Oat, 2007]. Des chercheurs ont initié un travail sur le rendu des rides d'expression. Leur présence permet notamment la création d'animations de qualité et améliore la perception des états émotionnels, une étude de De Melo et Gratch [2009] a démontré un effet positif pour la perception des émotions de colère (combinées au rougissement) et aussi pour la surprise et la tristesse (combinées aux larmes). L'importance des rides d'expression est également évoquée par Courgeon *et al.* [2009] qui montrent que les rides d'expression augmentent l'intensité expressive perçue, bien qu'elles n'impactent pas la reconnaissance catégorielle des émotions, et qu'elles sont appréciées par les utilisateurs (Figure 2.7).

Contrairement aux rides permanentes, faciles à intégrer car elles ne nécessitent pas d'adaptation en temps réel, la représentation des rides d'expression est plus délicate, elles doivent apparaître et évoluer en fonction de l'état émotionnel. Il existe deux approches différentes

afin d'intégrer ces rides sur un modèle 3D. L'approche générative implique une simulation physique du tissu, c'est une génération dynamique des rides. Les rides n'ont pas besoin d'être prédéfinies. Cependant, cette technique est complexe et nécessite des temps de calcul importants [Wu *et al.*, 1996].



FIGURE 2.7 – Agents sans ou avec rides d'expression, issus des travaux de Courgeon [2011]

L'approche paramétrique nécessite de prédéfinir les rides en amont, soit en les créant manuellement ou soit en les récupérant à partir de capture de mouvements ou de photos. Les rides seront déclenchées lors de l'animation en fonction des émotions exprimées. Il est possible d'intégrer les rides automatiquement grâce à la détection de compression du maillage [Larboulette et Cani, 2004], ou en créant une ou plusieurs *wrinkle maps* à appliquer sur le maillage du visage virtuel et à activer durant l'animation [Kaspersson, 2015]. Une *wrinkle map* est une texture dédiée aux rides à appliquer sur le visage de l'agent, elle contient les informations de relief relatives aux rides d'expression. Pour cette approche, il est recommandé de diviser le visage en plusieurs parties afin de pouvoir contrôler les rides par régions [Dutreuve *et al.*, 2009; Oat, 2007]. L'approche générative n'étant pas adaptée au temps réel, l'approche paramétrique sera celle utilisée dans nos travaux.

Parmi les réactions physiques liées aux émotions, la transpiration, les larmes et la pigmentation de la peau rentrent également en compte [De Melo et Gratch, 2009]. Concernant la pigmentation, les zones sensibles à ces changements sont : le visage, les oreilles, le cou et le haut du buste. La couleur de la peau est déterminée par la diffusion et l'absorption de la lumière au travers des couches de peau, causée principalement par la mélanine et l'hémoglobine. L'augmentation du volume sanguin dans ces régions se caractérise par un rougissement [De Melo et Gratch, 2009]. Jimenez *et al.* [2010a] ont mis en place une méthode notamment en analysant les réactions émotionnelles humaines et la concentration d'hémoglobine au niveau facial afin de pouvoir retranscrire ces effets de pigmentation de la peau sur les agents virtuels.

Pour cela, ils utilisent des « textures d'hémoglobine » (*hemoglobin map*) afin de contrôler la couleur de la peau (Figure 2.8).



FIGURE 2.8 – Illustration issue des travaux de [Jimenez *et al.*, 2010a]. Adaptation de la couleur de la peau des agents en fonction des émotions. De gauche à droite : tristesse accompagnée d'un sourire forcé, colère, neutre, peur et dégoût.

Certains chercheurs évoquent quant à eux l'importance de l'intensité des émotions [Hyde *et al.*, 2013; Lee et Xu, 2003; Mäkäräinen *et al.*, 2014; Pollick *et al.*, 2003]. Récemment, Melgare *et al.* [2019] ont mis en avant le fait que les participants préfèrent les humains virtuels les plus expressifs et les plus exagérés, sous entendu avec les émotions les plus intenses.

Enfin, des chercheurs ont mis également en avant le potentiel expressif des agents virtuels grâce au regard [Garau *et al.*, 2003; Ruhland *et al.*, 2015a]. Il est d'ailleurs possible d'utiliser la variation des pupilles comme stimuli [Partala et Surakka, 2003]. Des recherches sont effectuées concernant le comportement du regard des agents virtuels : contact visuel, clignement des yeux, dilatation des pupilles. Ces recherches sont bénéfiques et nécessaires à la conception d'un agent virtuel [Li *et al.*, 2009].

Pour conclure, une attention particulière doit être accordée à l'ensemble des facteurs d'expressivité afin de favoriser la perception des émotions sur l'agent. Enfin, l'éclairage, les ombres, et le style graphique appliqués à l'agent virtuel, peuvent également impacter la perception des émotions, c'est pourquoi ils doivent également être pris en considération [De Melo et Paiva, 2007].

Reconnaissance par l'utilisateur des expressions d'émotions affichées sur l'agent virtuel

La combinaison d'expressions faciales et corporelles est conseillée afin de concevoir des agents virtuels plus expressifs et favoriser la reconnaissance des émotions [Ennis *et al.*, 2013]. Comme évoqué précédemment, il existe de nombreux facteurs d'expressivité à prendre en compte pour faciliter la reconnaissance des émotions sur les agents virtuels [Coulson, 2004; Perrinet, 2013]. Des études ont notamment été menées sur la reconnaissance des émotions sur un humain virtuel grâce à ses expressions faciales. Dans l'étude de Dyck *et al.* [2008], les résultats indiquent que les émotions de base de l'humain virtuel sont proches d'être aussi bien reconnues que celles de l'humain réel. Dans la continuité de l'étude de Dyck, les études Geslin [2014]; Jackson *et al.* [2015] ont démontré que la reconnaissance d'émotions négatives (peur, colère, dégoût et douleur) sur des agents virtuels était convenable, toutefois il subsiste quelques confusions. En effet, les émotions partageant des caractéristiques communes, telles que les émotions négatives, s'avèrent plus complexes à reconnaître.

Dans le but d'évaluer et de comparer la reconnaissance des expressions d'émotions entre un humain réel et virtuel, des études se sont portées sur la question de la représentation de ces expressions d'émotions de manière statique ou dynamique. La représentation dynamique des expressions sur un visage virtuel augmente la précision globale lors de la reconnaissance et réduit le nombre de confusions [Ambadar *et al.*, 2005; Kätsyri et Sams, 2008; Wehrle *et al.*, 2000]. La perception des émotions peut également être influencée par la stylisation appliquée aux agents virtuels [Adamo *et al.*, 2019; Zell *et al.*, 2015]. En effet, selon les travaux de Adamo *et al.* [2019], la perception de l'intensité des émotions est meilleure pour l'agent cartoon par rapport à l'agent photoréaliste.

Enfin, le profil de l'observateur, c'est-à-dire l'utilisateur, doit être considéré lors de la reconnaissance des expressions d'émotions sur un agent. Les utilisateurs atteints de troubles autistiques, par exemple, peuvent potentiellement éprouver des difficultés à caractériser et à distinguer les émotions. Cela peut également être le cas pour les personnes âgées. Elles peuvent éprouver des difficultés lors de l'évaluation de certaines expressions faciales émotionnelles, avec notamment une diminution de la précision de la reconnaissance pour la colère, la peur et la joie d'un agent virtuel. Ces facteurs sont à prendre en compte pour évaluer la reconnaissance des expressions d'émotions affichées sur un agent virtuel [Beer *et al.*, 2009].

Modèles computationnels des émotions

L'intégration de réactions émotionnelles aux agents virtuels nécessite de manipuler un nombre important de paramètres d'animation. Toutefois, il existe des modèles computationnels basés sur les théories des émotions permettant une animation dynamique pré-réglée. Afin d'en avoir connaissance, trois de ces modèles sont brièvement présentés :

- EMA est un modèle informatique développé par Gratch et Marsella [Marsella *et al.*, 2010]. Ce modèle s'inspire des travaux de Lazarus sur la théorie de l'évaluation. Il comprend un processus d'évaluation et d'adaptation. L'évaluation de la situation permet à l'agent de déterminer quelles émotions doivent être exprimées suite à un événement. L'adaptation consiste à identifier le comportement qu'il doit adopter pour modifier la situation, ce qui lui permet de mettre en place une stratégie. La situation est de nouveau évaluée et des émotions sont déclenchées.



FIGURE 2.9 – Les agents GRETA, MAX et EMMA

- GRETA est un agent conversationnel animé. Des études ont été menées avec cet agent pour simuler des comportements communicatifs, émotionnels et des attitudes sociales. Greta est en capacité de communiquer avec un comportement verbal et non-verbal (regard, expressions faciales, mouvement de têtes, gestes, etc) [Niewiadomski *et al.*, 2009]. Elle est dotée de modules permettant la planification et la génération de comportements, d'émotions et d'intentions (ex : imitation) [De Sevin *et al.*, 2010]. Plusieurs recherches ont été effectuées à partir de l'agent Greta, permettant l'amélioration en continue du modèle.

- MAX est un agent virtuel, basé sur le modèle computationnel de raisonnement cognitif WASABI, permettant l'expression d'émotions primaires et secondaires [Becker-Asano et Wachsmuth, 2008]. L'agent est capable de communiquer avec un utilisateur à l'aide de paroles, de gestes, ainsi que d'expressions faciales émotionnelles. Suite à ces travaux, Boukricha a mis en place EMMA, un agent doté de caractéristiques essentielles pour exprimer et détecter des émotions ainsi qu'adopter des comportements empathiques. Une étude a été effectuée en faisant appel aux comportements et émotions de MAX, ainsi qu'aux réactions empathiques d'EMMA envers MAX [Boukricha, 2008; Boukricha *et al.*, 2013].

2.3.2 Réalisme visuel et comportemental

La conception d'agents virtuels expressifs implique également des choix de conception au niveau visuel et comportemental. Cette section est dédiée à ces deux notions qui impactent la perception de l'agent virtuel expressif par l'utilisateur.

Garau [2003] définit deux dimensions pour caractériser les avatars : la fidélité visuelle et la fidélité comportementale. Les travaux de Garau porte sur les avatars cependant ces notions sont transposables aux agents virtuels. Toutefois, afin de ne pas créer de confusion concernant le terme « fidélité » liée à la représentation de l'utilisateur (avatar), nous employerons pour les agents virtuels les termes « réalisme visuel » et « réalisme comportemental ».

Réalisme visuel

D'après l'étude de Garau [2003], le réalisme visuel se caractérise selon trois critères pour qualifier l'apparence :

- **l'anthropomorphisme** (humanoïde/non-humanoïde) ;
- **le réalisme** (stylisé/photoréaliste) ;
- **la véracité** (ressemble/ne ressemble pas à l'utilisateur), nous n'évoquerons pas ce critère de véracité s'appliquant pour un avatar, mais difficilement pour un agent.

L'anthropomorphisme correspond à l'attribution de caractéristiques morphologiques ou comportementales humaines à différentes entités, telles que les agents virtuels. Nous pouvons faire le parallèle avec les robots. Plus un robot a une apparence humanoïde, plus l'utilisateur a une perception positive de celui-ci et est apte à se mettre à sa place, Riek *et al.* [2009] précise que cela est dû à la théorie de l'esprit (évoquée dans la section 2.2.1), c'est-à-dire à la capacité de l'utilisateur de se représenter et de comprendre l'état mental et émotionnel exprimé par le robot.

Au sein de leurs travaux, Zell *et al.* [2019] ont listé ces caractéristiques liées à l'apparence de l'agent, incluant l'anthropomorphisme, le style graphique ainsi que l'apparence de la peau, le respect des proportions, les éclairages et les ombres. Les proportions humaines doivent être respectées au niveau corporel et facial. Des incohérences de morphologie au niveau du visage de l'agent affecteraient négativement la perception de l'utilisateur [MacDorman *et al.*, 2009; Seyama et Nagayama, 2007]. Travailler à partir de scans 3D renforce de fait l'apparence humanoïde des agents et participe au respect des proportions humaines, tel que présentés dans les travaux d'Alexander *et al.* [2010].

De fait, les utilisateurs accordent une attention particulière aux yeux, au nez ainsi qu'à la bouche des agents virtuels, tel qu'ils le font sur des humains [Ferstl *et al.*, 2016; MacDorman

et al., 2009; Zell *et al.*, 2019]. Ces propos sont confirmés par l'étude de Schwind et Jäger, qui ont démontré qu'il y a une corrélation entre les fixations oculaires sur les yeux de l'agent virtuel et la prise de décision ainsi que l'acceptabilité de l'agent virtuel par l'utilisateur. Avant d'émettre une réponse, les utilisateurs ont regardé les yeux de l'agent dans environ 35% des cas, et seulement entre 0 et 15% pour les autres régions (bouche, nez, joues, menton, front, etc.) [Schwind et Jäger, 2016]. Les chercheurs préconisent une meilleure prise en compte de la région oculaire afin d'améliorer le réalisme de l'agent virtuel et la perception par l'utilisateur [Raiturkar *et al.*, 2018; Schwind et Jäger, 2016].

La forme des yeux et du visage de l'agent virtuel peut également influencer la perception par l'utilisateur, notamment en ce qui concerne l'expressivité et la personnalité de l'agent [Ferstl et McDonnell, 2018; Nunnari et Heloir, 2017]. Dans leurs travaux, Ferstl et McDonnell [2018] mettent en avant le fait que les visages fins (étroits) sont perçus par les utilisateurs comme étant plus agressifs et moins dignes de confiance (Figure 2.10).



FIGURE 2.10 – Rendu des agents virtuels dont la forme du visage et des yeux ont été modifiées [Ferstl et McDonnell, 2018]. Au centre les visages les plus fins, aux extrémités les visages les plus larges.

Concernant le réalisme de l'apparence de l'agent, Garau [2003] préconise la prise en considération de la stylisation graphique. La notion de réalisme d'un agent virtuel est relative à la densité du maillage (niveau de détail) ainsi qu'à la stylisation graphique, dépendant notamment des textures, des matériaux et du type de shader utilisés [Zell *et al.*, 2019]. Le niveau de détail, indissociable du maillage 3D et ses textures, dépend également des contraintes matérielles qui permettent la puissance de calcul nécessaire au rendu 3D temps réel. L'utilisateur et son expérience sont affectés par les émotions transmises par les agents virtuels ainsi que par leur réalisme [Beale et Creed, 2009]. McDonnell *et al.* [2012] indiquent que les utilisateurs sont aussi à l'aise à échanger avec les agents virtuels réalistes qu'avec des agents de type cartoon (Figure 2.11). Les agents virtuels cartoons ont un seuil d'acceptabilité plus élevé et permettent de passer outre certaines imperfections techniques rencontrées par les agents réalistes. Les conclusions de ces études sont à mettre en perspective avec les capacités techniques car des travaux plus récents montrent notamment l'intérêt des agents réalistes. Les recherches de Chaturvedi et Volonte ajoutent que les agents réalistes ont un impact important sur les utilisateurs par rapport aux agents stylisés [Chaturvedi, 2015; Volonte *et al.*, 2016]. De plus,

Zibrek *et al.* [2019] mettent en avant le fait que le rendu photoréaliste impacte les réponses émotionnelles de l'utilisateur ainsi que son sentiment de présence. Ils indiquent aussi que, au sein d'une expérience en réalité virtuelle, les utilisateurs émettent une préférence pour les agents virtuels réalistes par rapport aux agents stylisés. Toutefois, les recherches récentes d'Adamo *et al.* [2019] ne constatent pas de différences significatives concernant la reconnaissance des émotions entre un agent virtuel réaliste ou stylisé.



FIGURE 2.11 – Exemple de différents styles graphiques appliqués aux agents virtuels (de gauche à droite : du moins réaliste au plus réaliste), extrait de McDonnell *et al.* [2012].

Afin d'améliorer la perception de l'agent virtuel et de son expressivité, il est possible d'exagérer ou d'adoucir certaines de ses caractéristiques. Dans leurs travaux de recherches, Zell *et al.* [2015] analysent deux facteurs influençant l'apparence de l'agent virtuel : les matériaux et les formes. Les formes sont le facteur dominant pour évaluer le réalisme et l'intensité de l'expression, alors que le niveau de stylisation des matériaux impacte l'attractivité du personnage. Fleming *et al.* [2016] ont également analysé l'impact des formes et des proportions sur l'attractivité des agents. Les résultats de leur étude démontrent que les utilisateurs évaluent les agents virtuels issus de scanners 3D comme étant plus attractifs lorsqu'ils ont une stylisation légère (33%) (Figure 2.12).

Nous supposons que les choix liés à la stylisation des agents virtuels dépendent principalement du contexte d'utilisation et des conditions expérimentales dans lesquels les agents seront utilisés.

De plus, le réalisme n'est pas le seul facteur d'attractivité ou d'acceptabilité [Zell *et al.*, 2015]. La cohérence entre le niveau de stylisation des matériaux et des formes est essentielle. Des incohérences auraient un impact négatif sur l'attractivité des modèles 3D.

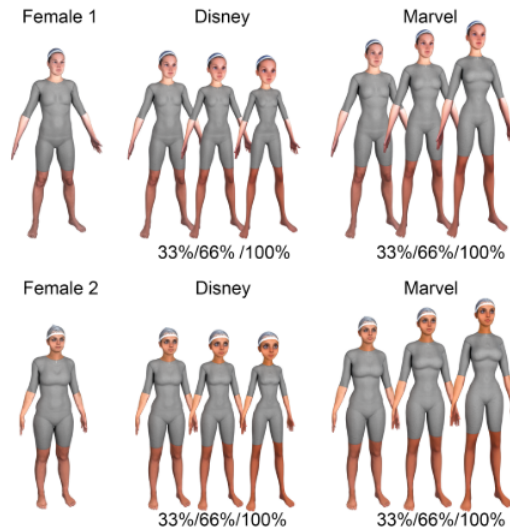


FIGURE 2.12 – Stylisation des corps à partir d'un scan 3D, extrait de Fleming *et al.* [2016]

Afin d'obtenir un modèle réaliste, il est important de prendre en compte les détails qui influencent notre perception tels que le grain de peau [D'Eon *et al.*, 2007] (Figure 2.13) ou encore les informations de transluminescence visibles sur notre visage.

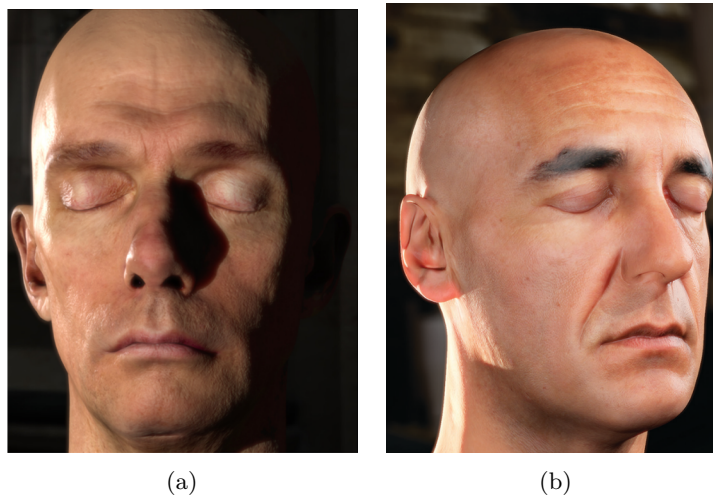


FIGURE 2.13 – Rendu d'une peau réaliste d'un agent virtuel par D'Eon *et al.* [2007] (a), et par Jimenez *et al.* [2010b] (b)

Ces informations de transluminescence, appelées *Subsurface Scattering* (SSS) en anglais, concernent le phénomène de pénétration de la lumière à travers les différentes couches de la peau. Le modèle BSSRDF (*Bidirectional Surface Scattering Reflection Distribution Function*) est un modèle de rendu de la peau performant prenant en compte l'influence de la composition chimique de la peau sur la couleur de la peau (hémoglobine et mélanine) ainsi que la diffusion de la lumière en surface de la peau. Jimenez a étudié ces effets et mis en place un rendu réaliste tout en prenant en compte la complexité de la peau [Jimenez *et al.*, 2010b] (Figure 2.14).

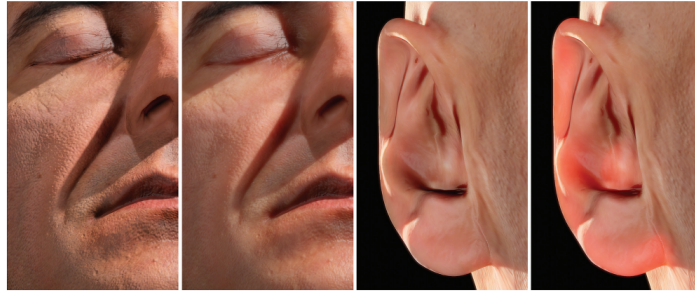


FIGURE 2.14 – Le visage de gauche et l'oreille gauche sont des rendus sans SSS alors le visage de droite et l'oreille de droite prennent en compte le SSS [Jimenez *et al.*, 2010b]

Dans le but d'améliorer le rendu réaliste des agents, il est conseillé d'exploiter des *shaders*⁴ PBR (*Physically Based Rendering*). Ce type de *shader* est un modèle d'illumination permettant la création de rendus 3D imitant les lois de la physique, en adéquation avec le comportement de la lumière, dans un environnement réel. Bien que nécessitant généralement plus de ressources que des *shaders* type cartoon (ex : *toon-shading*⁵) (Figure 2.15b), le *shader* PBR permet un rendu plus approprié à la conception des agents virtuels réalistes (Figure 2.15a). Ce type de *shader* facilite l'intégration d'informations de réflexion et de réfraction dépendantes de la lumière. Il permet également de spécifier la rugosité et le caractère métallique d'un modèle 3D.

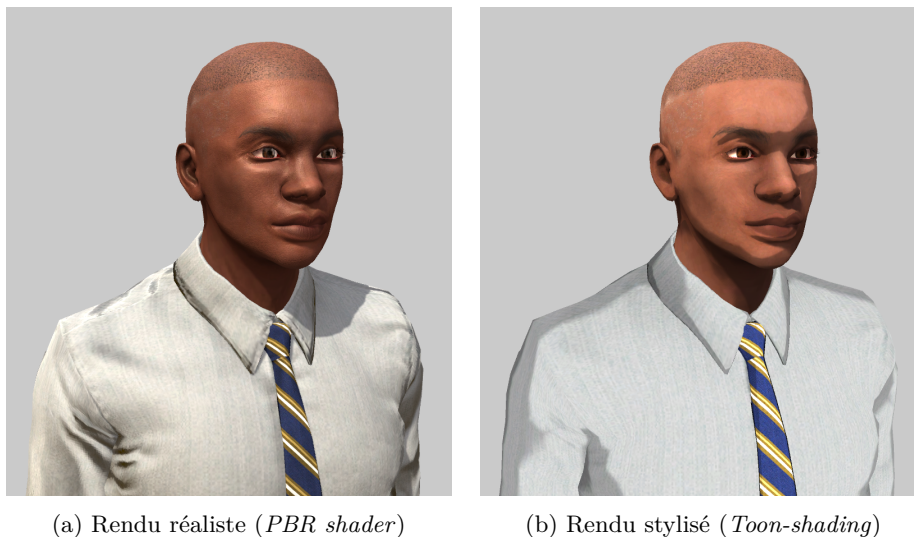


FIGURE 2.15 – Illustration du même personnage rendu avec deux niveaux de réalisme différents, dépendant du type de *shader* utilisé - SimforHealth

4. Un *shader* ou nuanceur est un programme informatique utilisé pour paramétrer une partie du processus de rendu réalisé par une carte graphique ou un moteur de rendu logiciel. Il sert à décrire l'absorption et la diffusion de la lumière, la texture à utiliser, les réflexions et réfractions, l'ombrage, le déplacement de primitives et des effets post-traitement.

5. Le *cel-shading* ou le *toon-shading* est un type de rendu non-photoréaliste qui consiste à rendre une image en aplats de couleur. Il est souvent utilisé afin d'imiter le style d'une bande-dessinée ou d'un dessin-animé.

Enfin, lors de la conception d'un agent, il est important d'accorder une attention particulière aux ombres et lumières. Celles-ci impactent l'expressivité et le réalisme visuel de l'agent virtuel [De Melo et Gratch, 2009]. Les différents éclairages n'influencent pas la perception des émotions, mais ils impactent l'intensité perçue des émotions des agents virtuels [Wisessing *et al.*, 2016] (Figure 2.16).

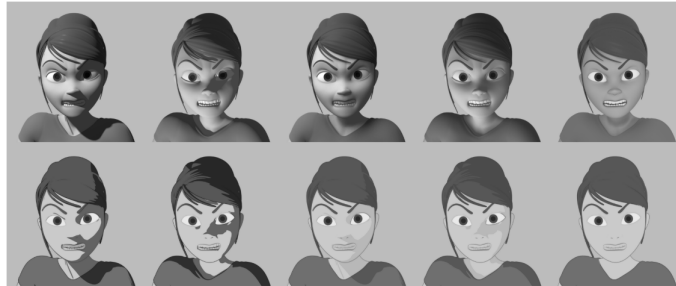


FIGURE 2.16 – Impact des éclairages sur la perception de l'agent virtuel par l'utilisateur [Wisessing *et al.*, 2016]

Les agents virtuels utilisés dans le cadre de nos travaux de recherche sont humanoïdes. Ils ont une apparence réaliste et un niveau de détail important (grain de peau, shader PBR, etc.). Ces choix graphiques ont été effectués, en adéquation avec les domaines d'application dans lesquels ils peuvent être utilisés, notamment la formation et la santé. Ces choix furent établis afin de respecter une certaine cohérence visuelle et en prenant en compte l'impact potentiel des agents virtuels sur l'utilisateur.

Réalisme comportemental

Garau [2003] différencie le réalisme visuel, qui concerne les propriétés statiques de l'apparence d'un personnage, du réalisme comportemental qui concerne les propriétés dynamiques telles que les animations corporelles ou faciales.

Un agent ayant un réalisme visuel élevé augmente les attentes en matière de réalisme comportemental [McDonnell *et al.*, 2012; Zibrek *et al.*, 2019]. Afin de garantir ce réalisme comportemental, il est nécessaire que l'attitude ainsi que les réactions corporelles de l'agent virtuel soient cohérentes ainsi qu'appropriées au contexte de l'expérience virtuelle. L'agent, son comportement et ses réactions doivent être crédibles du point de vue de l'utilisateur.

Le comportement et l'apparence des agents virtuels peuvent influencer les réactions de l'utilisateur et l'affecter émotionnellement. De fait, cela peut impacter la perception de la personnalité et des caractéristiques sociales de l'agent. Le comportement des agents virtuels en dit beaucoup sur leur personnalité et le vécu qui leur est attribué. Hyde *et al.* [2016] ont d'ailleurs étudié l'impact du comportement de l'agent sur la perception de sa personnalité et

de son attitude. Un agent réaliste avec des expressions faciales faibles apparaît comme étant calme, respectueux, compétent et chaleureux, alors que s'il est doté d'expressions faciales très exagérées, il peut sembler peu sincère voire irrespectueux. C'est pourquoi le réalisme comportemental doit être pris en compte pour la conception d'un agent virtuel. Ruhland *et al.* [2015b] ont également mené des recherches sur l'impact des mouvements de tête et des mouvements oculaires sur la perception de l'agent virtuel et de sa personnalité. Les participants sont aptes à reconnaître les différents traits de personnalité, représentés seulement avec le regard et les mouvements de tête, que ce soit sur un agent virtuel réaliste ou cartoon. De plus, Tinwell *et al.* [2013] recommandent la présence de réactions adaptées, notamment dans la région oculaire des agents virtuels afin d'éviter qu'ils ne soient perçus comme étranges. Tel que chez un humain, les réactions liées à des situations émotionnelles sont visibles dans la zone oculaire, toutefois l'absence de ce marqueur facial peut être relié à la psychopathie.

L'apparence de l'agent virtuel doit également être en adéquation avec son comportement verbal et notamment sa voix [Mitchell *et al.*, 2011]. L'animation des visèmes⁶ est également un élément important afin de garantir une cohérence comportementale en lien avec les émotions, le comportement non-verbal et verbal de l'agent virtuel (Figure 2.17)⁷.

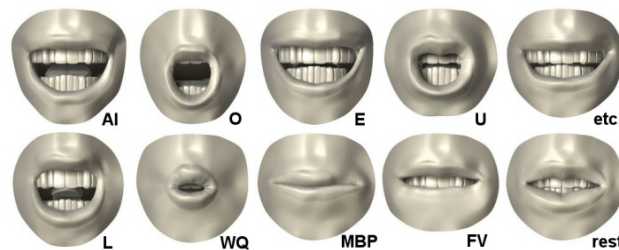


FIGURE 2.17 – Illustration des visèmes permettant une animation adaptée lors des dialogues

En règle générale, les humains émettent des avis et portent des jugements sur autrui notamment en fonction de leur apparence et de leur comportement. Ces mêmes jugements sont présents avec des agents virtuels. D'après Zibrek *et al.* [2018], l'affinité envers les agents virtuels est une interaction complexe entre l'apparence et la personnalité du personnage.

Cohérence et acceptation de l'agent virtuel

Dans les sections précédentes, nous avons évoqué l'expressivité puis le réalisme visuel et comportemental de l'agent virtuel dans le but de prendre connaissance des recommandations existantes pour la conception d'un agent virtuel réaliste et expressif.

6. Expression faciale associée à l'élocution d'un phonème.

7. http://www.garycmartin.com/mouth_shapes.html

L'acceptation de l'humain virtuel se déroule en trois phases selon les travaux de Hoorn et Konijn [2003]. Lors de la première phase, l'utilisateur va évaluer l'agent virtuel, en terme de morale, d'apparence (esthétique), de réalisme, ainsi que le contexte dans lequel il se trouve. La seconde phase correspond à une comparaison, l'individu va évaluer ses propres buts et ceux de l'agent. L'utilisateur identifie les caractéristiques en commun avec l'agent et détermine leurs valences. Enfin, la troisième phase est considérée comme étant la phase de réponse. Il est question de l'implication et de l'engagement de l'utilisateur.

Afin de créer des interactions crédibles entre l'utilisateur et l'agent, il est primordial que l'utilisateur accepte l'agent virtuel. Cette acceptabilité repose sur la cohérence perçue par l'utilisateur, un équilibre entre les différentes notions de réalisme. Gorisse [2019] décrit cette cohérence s'appliquant à deux niveaux : intrinsèque et extrinsèque.

La cohérence extrinsèque provient d'une relation crédible entre les agents virtuels et leur environnement. L'agent doit être en adéquation avec les éléments visuels intégrés au sein de l'environnement. Par exemple, si une application utilise un environnement virtuel hospitalier, il sera préférable que l'agent soit adapté à son rôle et à son environnement. L'environnement, par les éléments le composant ainsi que son éclairage, son ambiance sonore, etc., impacte l'expérience de l'utilisateur d'où la nécessité de cohérence entre l'environnement et l'agent. Gorisse [2019] précise que la cohérence perçue des agents et des environnements virtuels est influencée par notre culture (œuvres littéraires, théâtrales, cinématographiques ou encore vidéoludiques) qui favorise notre potentiel d'acceptation.

La cohérence intrinsèque repose sur l'adéquation entre le réalisme visuel et comportemental de l'agent virtuel tel que l'évoquait Zibrek *et al.* [2018]. Une incohérence entre les deux niveaux de réalisme aboutirait à un rejet de la part de l'utilisateur.

L'utilisateur est très sensible au réalisme comportemental de l'agent virtuel. En effet, il risque de pas accepter l'agent s'il montre des signes de psychopathie ou lorsqu'il y a un manque de fluidité et de réalisme dans l'expression de ses émotions et dans la retranscription de ses mouvements [Tinwell *et al.*, 2011, 2013; Volonte *et al.*, 2016]. Pour illustrer ces propos, prenons l'exemple de l'ajout d'un sourire à un personnage, cela correspond à une suite de déformations faciales afin d'obtenir un mouvement. La vitesse de ce mouvement, c'est-à-dire une dynamique fluide des mouvements, est importante pour la cohérence. Si cette vitesse est mal gérée, l'expression de l'agent semble étrange et incohérente.

Phénomène de l'*Uncanny Valley*

La non-acceptation d'un personnage est liée au phénomène de l'*Uncanny Valley*, en français la « vallée de l'étrange », décrit par le roboticien japonais Masahiro Mori dans les années 1970 [Mori *et al.*, 2012, 1970]. Cette théorie indique que le réalisme visuel et comportemental d'une entité (telle qu'un robot, une prothèse, une marionnette ou encore un agent virtuel) impactent notre capacité à l'accepter ou à la rejeter. L'intitulé *Uncanny Valley* provient du schéma de Mori *et al.* [1970] représentant ce phénomène (Figure 2.18).

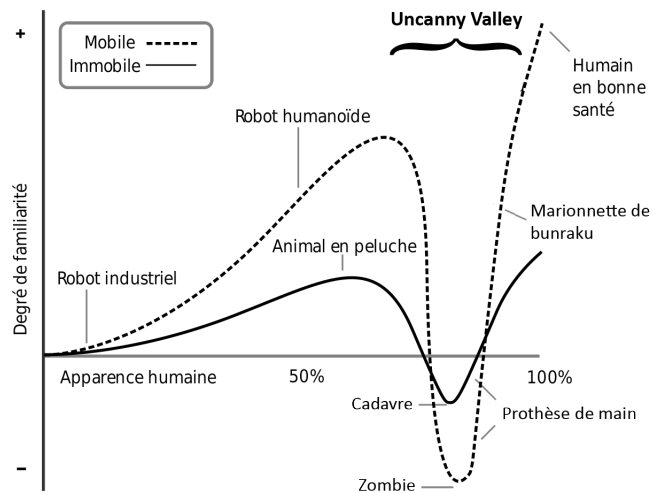


FIGURE 2.18 – Courbe de la théorie de l'*Uncanny Valley* [Mori *et al.*, 2012, 1970] illustrant la variation entre la ressemblance humaine et l'acceptabilité d'une entité immobile et animée

Plus une entité semble réaliste, plus ses défauts ou ses imperfections nous paraissent importants. Si l'humain virtuel se rapproche d'une apparence et d'un comportement réaliste, mais ne les atteint pas totalement, cela peut aboutir à un sentiment dérangent et déplaisant, l'utilisateur sera enclin à la répulsion. La cohérence visuelle et comportementale est centrale et amplifie le phénomène d'acceptation ou de rejet. Prenant en compte le risque lié à l'*Uncanny Valley*, Mori préconise de prendre comme objectif d'atteindre le premier sommet, c'est-à-dire avec un degré de ressemblance modéré et avec une acceptabilité élevée, puis de tenter d'atteindre le second sommet.

Des techniques avancées permettent à présent la conception d'agents virtuels réalistes notamment grâce au scanner 3D ainsi qu'à la capture de mouvements. Ces procédés aident à lutter contre le phénomène de l'*Uncanny Valley*, tel que dans le jeu vidéo *Death Stranding* (figure 2.19). Toutefois, malgré l'utilisation de ces dispositifs, il y a encore une part importante du travail de production artistique, notamment concernant le réalisme comportemental.



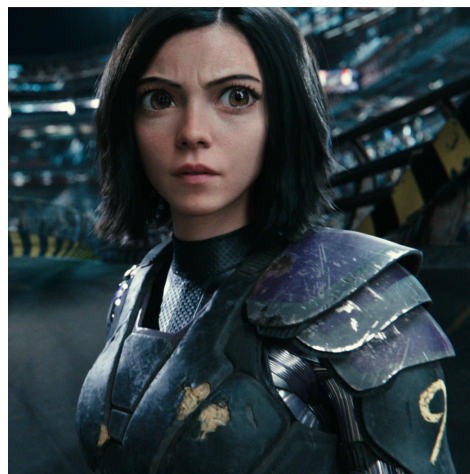
(a) *Death Stranding* - Kojima Productions



(b) *Last of us* - Naughty Dog



(c) *Mass Effect 3* - BioWare



(d) *Alita : Battle Angel's* - 20th Century Fox

FIGURE 2.19 – Illustrations issues de jeux vidéo et de films dont les personnages présentent différents niveaux de réalisme et d'expressivité. Les personnages des figures c) et d) ont engendré de nombreuses critiques négatives vis-à-vis de leur réalisme visuel et comportemental, évoquant le phénomène de l'*Uncanny Valley* [Mori *et al.*, 2012, 1970].

Pour conclure, afin de favoriser l'acceptabilité des agents, un équilibre doit être trouvé entre le réalisme visuel et comportemental. Les différents critères de réalisme doivent être pris en compte et être cohérents avec l'environnement. Des chercheurs ont effectué des recommandations pour la conception des agents afin d'éviter le phénomène de l'*Uncanny Valley* [Schwind *et al.*, 2018] :

- Éviter les éléments atypiques sur un agent réaliste (respect des proportions) ;
- Travailler le regard et les yeux de l'agent virtuel afin de les rendre plus réalistes ;
- Styliser modérément l'agent virtuel ;
- Ajouter des éléments attractifs sur les agents tels que une peau naturelle avec une pigmentation, paraître en bonne santé, un corps avec des proportions réalistes, un genre défini, des lèvres colorées et pulpeuses. Il ne faut pas chercher à atteindre la perfection. De petites imperfections sur la peau ou une symétrie faciale imparfaite sont des

imperfections réalistes ;

- Faire personnaliser un agent par l'utilisateur. En effet, la customisation, lorsque cela est possible, permet à l'utilisateur d'apprécier son agent et aide à surmonter le phénomène l'*Uncanny Valley* ;
- Utiliser volontairement le phénomène de l'*Uncanny Valley* pour induire délibérément un effet « étrange » notamment pour des personnages que l'on souhaiterait faire apparaître comme ambigus ou méchants.

Ces recommandations sont à prendre en considération selon le contexte d'utilisation.

2.3.3 Impact des agents virtuels expressifs sur l'interaction humain-machine

Les notions d'expressivité, de réalisme comportemental ainsi que de réalisme visuel soulèvent des questions sur les interactions entre les humains et les agents virtuels, ainsi que sur les impacts potentiels sur l'utilisateur.

Le réalisme visuel et comportemental des agents virtuels impacte la perception et le comportement de l'utilisateur. Dans l'étude de Qiu, l'anthropomorphisme de l'agent et sa capacité à échanger influencent la perception de l'utilisateur, sa confiance envers l'agent ainsi que son intention d'utiliser l'agent comme conseiller pour prendre des décisions [Qiu et Benbasat, 2009]. Le réalisme visuel a également un effet significatif sur les réactions émotionnelles positives et négatives des utilisateurs [Chaturvedi *et al.*, 2015].

La retransmission de l'état émotionnel et mental de l'agent est un facteur important de crédibilité pour l'utilisateur [Bates, 1994; Lemoine et Cherif, 2012]. L'expressivité de l'agent favorise les échanges, les utilisateurs peuvent ressentir de la confiance ainsi qu'une forme d'attachement envers ces personnages [Bickmore et Cassell, 2001; Chaturvedi, 2015]. D'après Coulson *et al.* [2012], cela dépend de l'apparence des agents, de leur personnalité, de leur comportement (amical ou hostile), de leur rôle, ainsi que de leur utilité générale dans le scénario et l'environnement virtuel. Ainsi, l'expressivité d'un agent peut également impacter les prises de décisions et la volonté de l'utilisateur à interagir de nouveau avec l'agent virtuel, tel que l'ont démontré De Melo *et al.* [2012]. Ils indiquent que les manifestations de culpabilité chez un agent poussent les utilisateurs à concéder davantage lors d'une phase de négociation, toutefois les utilisateurs sont moins enclins à interagir avec ces agents à l'avenir. En effet, d'après Schrammel *et al.* [2009], l'utilisateur modifierait son comportement selon les émotions exprimées par l'agent. Par exemple, si l'agent exprime de la colère, l'utilisateur s'adaptera notamment en fixant plus longuement l'agent afin de se préparer à une éventuelle menace lors de ces interactions sociales [Schrammel *et al.*, 2009]. Enfin, si l'agent virtuel a un comportement immoral ou allant à l'encontre des principes éthiques de l'utilisateur, cela pourrait influencer négativement la perception de l'agent par l'utilisateur.

Les agents virtuels expressifs ont déjà été utilisés dans le but d'analyser ou de générer des comportements positifs comme négatifs chez l'utilisateur. Cela a notamment été le cas lors de recherches pour étudier les réactions à la violence dans un environnement virtuel [Hartmann *et al.*, 2010; Rovira *et al.*, 2009], tel que l'étude de Slater ayant pour but de reproduire l'expérience d'obéissance de Milgram avec des agents virtuels subissant les chocs électriques [Slater *et al.*, 2006]. Le rôle confié aux agents virtuels peut également influencer positivement l'utilisateur [Baylor et Kim, 2004]. Lors d'utilisation d'agents pédagogiques, les encouragements

des agents impactent l'apprenant et son efficacité. En complément du réalisme comportemental, les recherches de Baylor et Kim [2004] ont également mis en exergue le réalisme visuel des agents pédagogiques, car cela influence positivement le transfert de connaissances lors d'interactions avec l'agent virtuel réaliste par rapport à l'agent au rendu cartoon.

En résumé, cette sous-partie de notre revue de littérature illustre les impacts du réalisme visuel et comportemental sur les interactions entre humain et agent virtuel, notamment sur la perception et le comportement de l'utilisateur.

Notions-clés de cette section :

- Un agent virtuel est un agent autonome au sein d'un environnement virtuel. Il peut avoir une apparence humanoïde et un comportement similaire à celui d'un humain réel.
- L'expressivité, le réalisme visuel et comportemental des agents virtuels impactent la perception et le comportement de l'utilisateur.
- L'expressivité des agents virtuels favorise les interactions avec les utilisateurs.
- Une attention particulière doit être accordée à l'apparence de l'agent virtuel, ainsi qu'à la cohérence entre le réalisme visuel et comportemental afin d'éviter le phénomène de l'*Uncanny Valley*.

2.4 Les agents virtuels et l'empathie

Nous avons au préalable défini les théories de l'empathie ainsi que les recommandations relatives à la conception des agents virtuels expressifs. Nous allons à présent détailler le cœur de nos recherches : les agents virtuels cibles d'empathie. Nous définirons les agents empathiques puis nous détaillerons la création d'une situation empathique intégrant des agents virtuels. Enfin, nous évoquerons les recherches antérieures sur les facteurs d'empathie.

2.4.1 Les agents empathiques et leurs modèles

Les agents virtuels impactant l'utilisateur, en induisant des réponses émotionnelles voire empathiques, ont des particularités et sont nommés les agents empathiques. Nous allons définir ces agents et leurs rôles dans cette section. Ces agents empathiques sont décrits selon deux définitions [Paiva, 2011; Paiva *et al.*, 2017] :

- **Des agents qui possèdent des réactions empathiques envers l'utilisateur ou un autre agent.** Dans ce cas, ces agents sont les observateurs de la situation empathique (appelés *observer* en anglais), ils s'identifient et ressentent de l'empathie pour l'utilisateur lors de situations émotionnelles (Figure 2.20b).

- **Des agents dotés d'émotions, qui génèrent chez l'utilisateur des réactions empathiques** et adaptées à la situation émotionnelle de l'agent. Ils sont conçus pour susciter de l'empathie chez l'utilisateur, ils sont les cibles d'empathie (appelés *empathizer* en anglais). Dans ce cas, l'utilisateur est l'observateur, car il s'identifie à l'agent pour se mettre à sa place et avoir une réponse affective adaptée (Figure 2.20a).

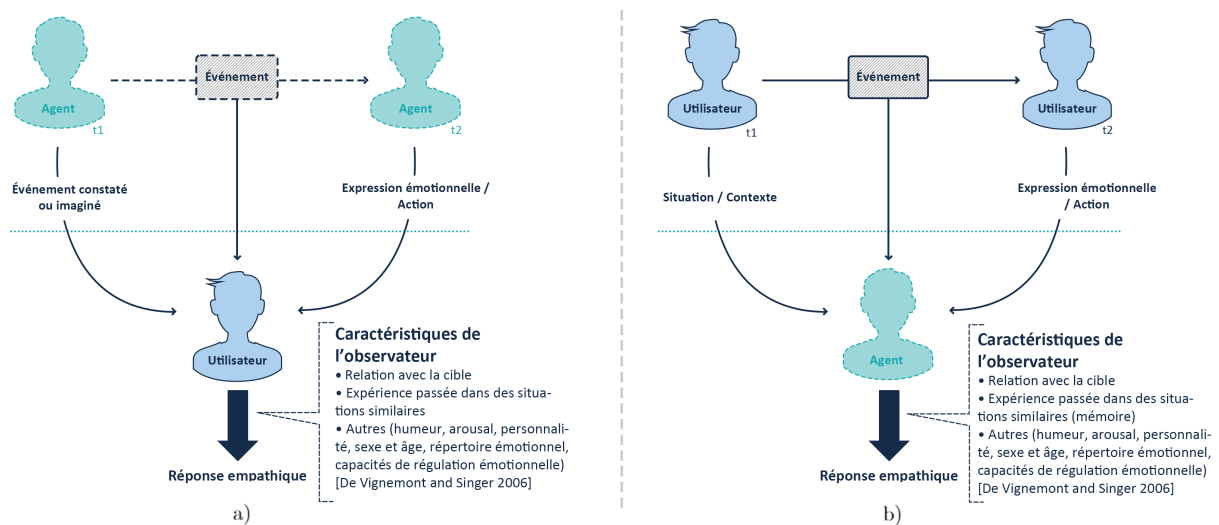


FIGURE 2.20 – a) Situation empathique intégrant un agent cible de l'empathie de l'utilisateur. b) Situation empathique intégrant un agent exprimant de l'empathie [Paiva *et al.*, 2017]

Des chercheurs ont analysé les agents empathiques ainsi que leurs impacts sur l'utilisateur. Paiva *et al.* [2017] ont défini les critères d'induction d'empathie envers les agents virtuels, que nous détaillerons dans la section suivante (section 2.4.2). En se basant sur des modèles théoriques de l'empathie, des recherches ont été entreprises sur la conception de modèles computationnels d'empathie. Ils ont pour but d'aider à modéliser ainsi qu'à comprendre le lien entre les agents virtuels et la possibilité d'évoquer des réactions émotionnelles et empathiques.

Parmi ces modèles, Ochs *et al.* [2012] ont proposé un modèle computationnel des émotions empathiques. L'émotion empathique de l'agent est exprimée par des expressions faciales, et est affectée par l'évaluation de la situation. À travers trois types d'agents : non-expressif, expressif empathique, expressif mais non-congruent avec la situation (émotions inverses à celles exprimées par l'agent empathique), ces travaux ont pour but d'évaluer l'impact de l'agent empathique sur l'interaction humain-machine, et plus précisément sur la perception de l'utilisateur. Les résultats de cette étude révèlent qu'un agent virtuel qui exprime des émotions incongrues est perçu plus négativement qu'un agent qui n'exprime aucune émotion. En outre, l'agent virtuel apparaît plus expressif et plus jovial lorsqu'il exprime des émotions empathiques positives et négatives que lorsqu'il ne manifeste aucune émotion. Il est également perçu plus positivement que celui qui n'exprime aucune émotion. La perception globale de l'agent dépend de la cohérence entre les situations de dialogue et les expressions des émotions.

Rodrigues *et al.* ont également créé un modèle computationnel d'empathie en deux étapes [Rodrigues *et al.*, 2009, 2015]. La première consiste en l'évaluation empathique, prenant en compte la perception de l'état affectif d'autrui et la prise de perspective, ainsi qu'une phase de modulation de l'empathie. La deuxième étape consiste en la génération d'une réponse empathique (Figure 2.21). Ce modèle a été utilisé pour simuler un scénario social avec un petit groupe d'agents, dont les résultats ont révélé que l'utilisation du modèle d'empathie a modifié de manière significative la façon dont les utilisateurs ont perçu et décrit les interactions entre les agents. Lors de ce modèle, l'agent préféré de l'utilisateur devenait le personnage ayant la réponse empathique la plus forte. Ces résultats indiquent que les agents empathiques sont perçus différemment de ceux qui ne sont pas empathiques, cependant, l'effet de l'empathie n'est pas toujours le même. Rodrigues *et al.* [2015] précisent que la situation dans laquelle l'empathie se manifeste ainsi que la cible de l'empathie sont des facteurs importants dans le jugement du comportement empathique de l'agent perçu par l'utilisateur.

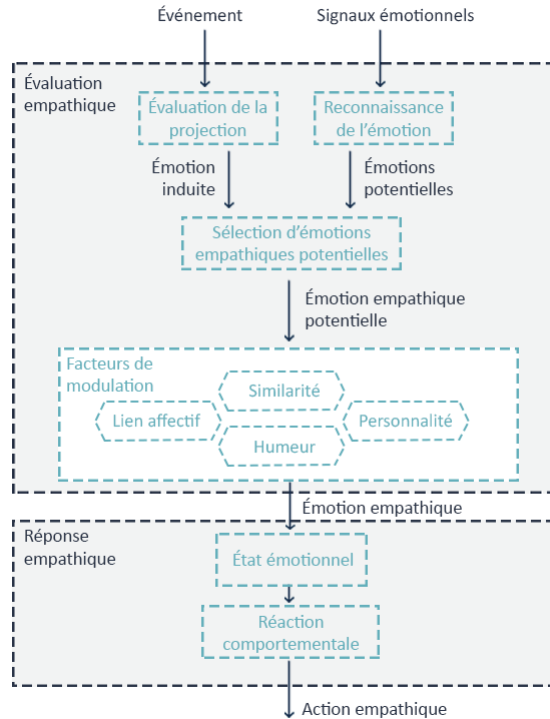


FIGURE 2.21 – Modèle d'empathie (notre traduction) [Rodrigues *et al.*, 2009, 2015]

Dans la continuité de travaux de Rodrigues *et al.* [2009], Boukricha [2013] a, quant à elle, proposé un modèle d'empathie pour les humains virtuels en trois étapes : les mécanismes d'empathie, la modulation empathique ainsi que l'expression de l'empathie. Pour les mécanismes d'empathie, le mimétisme facial et la prise de perspective sont pris en compte. Dans la lignée des résultats de l'étude de Rodrigues *et al.* [2015], cette étude démontre que l'utilisateur évalue les agents comme étant plus sympathiques lorsqu'ils expriment un fort degré d'empathie. Enfin, Yalcin et DiPaola [2018] ont récemment orienté leurs recherches sur un modèle d'empathie axé sur trois composantes : les compétences en communication (imitation, reconnaissance et expression des émotions), la régulation des émotions et les mécanismes cognitifs.

Dans le cadre de notre revue de littérature, nous avons abordé les deux définitions des agents empathiques. Le périmètre de nos investigations se limite à la seconde définition : les agents cibles d'empathie. Pour ces derniers, différents critères sont à prendre en compte pour la mise en place d'une situation empathique, ils seront détaillés dans la sous-partie suivante.

2.4.2 Création d'une situation empathique en environnements virtuels

Cette partie traite des facteurs à considérer pour créer une situation empathique intégrant un agent cible de l'empathie de l'utilisateur. D'après Paiva *et al.* [2017], les facteurs à prendre en compte sont les mécanismes de l'empathie, la situation et le contexte, les caractéristiques de l'utilisateur, les caractéristiques de l'agent virtuel, et la modulation d'empathie.

- **Mécanismes de l'empathie**

Lors d'interactions entre un humain et un agent cible d'empathie, les mécanismes d'empathie font référence aux mêmes théories que celles pour les humains. Il existe deux mécanismes pour que l'utilisateur éprouve de l'empathie envers un agent. L'interaction doit affecter les émotions de l'utilisateur au travers d'une situation, créée dans le but de manipuler la relation entre l'utilisateur et l'agent. Cette situation encourage l'utilisateur à reconnaître les émotions et à se projeter à la place de l'agent en se basant sur un mécanisme cognitif lié à la prise de perspective ; ou au travers des expressions émotionnelles de l'agent, qui peuvent déclencher de l'empathie grâce à un phénomène automatique d'imitation et de rétroaction [Boukricha, 2013; Paiva *et al.*, 2004, 2017].

Ces mécanismes sont relatifs aux deux composantes de l'empathie. L'empathie cognitive peut être déclenchée grâce à une expérience émotionnelle résultant du développement de relations empathiques entre l'utilisateur et l'agent, ainsi qu'en impliquant une situation et un agent faisant appel à la capacité de prise de perspective de l'utilisateur en se basant sur ses connaissances, ses croyances ou encore son vécu [Hall *et al.*, 2006]. Concernant l'empathie affective, son activation peut être relative au comportement non-verbal et aux expressions faciales de l'agent virtuel [Hasler *et al.*, 2017]. Le mimétisme des gestes est apprécié par les utilisateurs et améliore les interactions humain-machine [Luo *et al.*, 2013]. De plus, les agents dotés de capacité d'imitation facilitent l'acceptation de l'agent et l'empathie de l'utilisateur [Bailenson *et al.*, 2008; Hasler *et al.*, 2014]. Lors de leurs recherches, Tsai *et al.* ont exploré l'existence d'une contagion émotionnelle née d'interactions entre l'agent et l'utilisateur. L'utilisateur est sensible aux expressions faciales émotionnelles de l'agent ce qui semble permettre l'activation du mécanisme d'empathie affective. Ainsi, ils recommandent la prise en compte de la contagion émotionnelle pour la conception d'applications intégrant des agents virtuels [Tsai *et al.*, 2012a,b].

Néanmoins, il est important de noter que l'activation des mécanismes d'empathie est rendue possible si cela ne nécessite pas de changements importants chez l'utilisateur, notamment sa personnalité, sa morale ou son éthique [Belman et Flanagan, 2010].

- **Situation/contexte**

Afin d'induire de l'empathie chez l'utilisateur, il est nécessaire que la situation et le contexte s'y prêtent. L'utilisateur partage la situation dans laquelle se trouve l'agent, elle doit être suffisamment engageante pour qu'il puisse s'immerger et établir un lien avec l'agent virtuel. La situation doit présenter un contexte émotionnel fort afin de faciliter l'apparition de comportements sociaux, d'émotions ou encore de réactions empathiques chez l'utilisateur.

Le contexte doit être adapté à la cible ainsi qu'au domaine d'application dans lequel sera utilisée l'expérience : à but ludique ou de formation par exemple. Le scénario, la narration et les interactions doivent également être adaptés afin de favoriser l'induction d'empathie. Cela signifie que le scénario doit contenir un élément déclencheur, favorisant l'activation des mécanismes de l'empathie chez l'utilisateur et ayant des conséquences directes ou indirectes sur l'agent. Cet événement déclenche l'expression d'une émotion, plus ou moins intense, positive ou négative selon s'il facilite ou entrave la réussite d'un but. En effet, la désirabilité ou l'indésirabilité d'un événement impactant l'agent virtuel influencent les réactions empathiques de l'utilisateur. Si l'agent est dans une situation indésirable qu'il ne semble pas avoir mérité, l'utilisateur sera plus sensible à sa détresse. Ainsi, l'utilisateur va juger la situation. Selon l'évaluation, les mécanismes d'empathie de l'utilisateur vont s'activer. Travailler sur le contexte implique aussi un travail sur l'environnement virtuel dans lequel évolue l'agent et dans lequel se déroule la situation.

La présence de plusieurs agents peut également rendre difficile l'induction d'empathie, notamment si l'utilisateur est confronté simultanément à des agents exprimant des émotions différentes, c'est également le cas dans les interactions humaines [De Vignemont et Singer, 2006]. Enfin, la présence d'utilisateurs témoins des interactions entre l'utilisateur principal et l'agent, peut influencer les réponses empathiques. Dans l'étude de Hall [2005] portant sur les réactions des utilisateurs face à la douleur des agents, les utilisateurs manifestent de l'anxiété quant aux perceptions des autres sur leurs interactions avec l'agent.

Enfin, la durée des interactions avec l'agent peut impacter l'empathie de l'utilisateur. La durée des échanges est d'ailleurs un des facteurs de modulation d'empathie pour les interactions entre humains [Davis, 1994]. Un scénario divisé en plusieurs situations ainsi que des échanges prolongés ou sur le long terme, avec un agent doté d'un comportement réaliste, peuvent s'apparenter à la création d'une relation avec l'utilisateur [Bickmore *et al.*, 2010].

• **Caractéristiques de l'utilisateur**

Les caractéristiques de l'observateur peuvent influencer ses réactions empathiques, c'est pourquoi nous devons les prendre en considération [Paiva *et al.*, 2017]. Parmi ces facteurs, il y a notamment l'âge, le sexe, l'histoire personnelle, la culture, les capacités sociales, ou encore les différences individuelles [Davis, 1994; De Vignemont et Singer, 2006] (voir Section 2.2.1).

L'âge de l'utilisateur doit être pris en compte afin de faciliter l'apparition de réponses empathiques, que ce soit en adaptant le contenu ou l'agent virtuel. Dans l'étude de Hall *et al.* [2004], les enfants sont plus susceptibles de ressentir de l'empathie que les adultes, car le scénario leur est adapté. L'attitude des enfants est donc plus positive envers l'environnement scolaire, l'apparence de l'agent et ses comportements, la conversation ainsi que le scénario. De plus, dans le cas où les utilisateurs sont des personnes âgées, il peut être nécessaire d'adapter l'agent virtuel, son apparence ainsi que son expressivité par exemple, car ils peuvent potentiellement éprouver des difficultés à reconnaître les expressions d'émotions [Beer *et al.*, 2009]. Concernant le sexe, certaines recherches ont mis en avant des différences, notamment en indiquant que les femmes étaient plus empathiques et plus aptes à reconnaître les émotions [Baron-Cohen et Wheelwright, 2004; Hall et Matsumoto, 2004]. Cependant, comme évoqué précédemment, il semble que l'impact du genre soit controversé, et vu comme un effet sociétal qui pourrait donc tendre à évoluer [Lennon et Eisenberg, 1987].

Les origines culturelles peuvent également influencer l'utilisateur et l'apparition de réponses empathiques. Selon les cultures, il est plus ou moins opportun d'exprimer ses émotions avec plus ou moins d'intensité. Certaines cultures fonctionnent avec des normes qui impactent la régulation des émotions [Matsumoto *et al.*, 2008]. Ces différences culturelles doivent être prises en compte lors de la conception de l'application afin de s'adapter à la cible. Dans la mesure du possible et si cela fait sens, il est opportun d'adapter le scénario, le réalisme visuel et comportemental de l'agent en fonction des origines culturelles de l'utilisateur.

En outre, De Vignemont et Singer [2006] et Davis [1994] indiquent que l'histoire personnelle peut impacter les réactions empathiques. Par exemple, les expériences passées ou la profession de l'utilisateur peuvent impacter ses interactions avec l'agent. Nous pouvons imaginer qu'un enseignant réagira différemment face à des agents représentant des enfants, qu'une personne n'étant jamais en contact avec la petite enfance, d'où la nécessité d'adapter les échanges et l'expérience. De plus, si l'utilisateur a déjà vécu un événement similaire à celui évoqué ou vécu par l'agent, l'utilisateur est plus en mesure de se mettre à sa place ayant un cadre référentiel. Enfin, il y a des différences individuelles auxquelles il faut porter attention. Des maladies telles que l'autisme, peuvent altérer la reconnaissance des émotions et compliquer la projection à la place d'autrui [Sucksmith *et al.*, 2013].

Pour résumé, les interactions doivent être adaptées à la situation et aux utilisateurs. En effet, la mise en place d'interactions personnifiées grâce à la connaissance de certaines caractéristiques de l'utilisateur peut être un atout afin de favoriser l'induction d'empathie envers un agent virtuel.

- **Caractéristiques de l'agent**

L'agent virtuel et ses caractéristiques peuvent influencer la mise en place d'une situation empathique [Paiva *et al.*, 2017]. Le réalisme visuel de l'agent virtuel, notamment son apparence et son niveau d'anthropomorphisme, peuvent impacter l'empathie de l'utilisateur. Certains chercheurs ont aussi mis en avant que le genre de l'agent virtuel pouvait impacter la perception de son expressivité. Ainsi, selon [Ennis *et al.*, 2013], les agents virtuels féminins expriment mieux les émotions (notamment la joie, la tristesse et la peur). Cela suppose que pour créer une situation empathique, un agent féminin est préconisé, car l'utilisateur aura plus de facilité à la reconnaissance de ses émotions.

Le comportement verbal et non-verbal de l'agent doit être cohérent et adapté. Comme évoqué précédemment, les gestes, la voix, les dialogues, l'attitude ou encore le regard peuvent participer à l'immersion de l'utilisateur dans un contexte émotionnel fort et faciliter l'apparition de réactions émotionnelles. Les utilisateurs sont également sensibles aux expressions faciales émotionnelles des agents virtuels, cela enrichit leur expérience et leur engagement [Fabri et Moore, 2005]. Les chercheurs Philip *et al.* [2018]; Weyers *et al.* [2006] et Ravaja *et al.* [2016] ont également travaillé sur les réactions des utilisateurs face aux expressions faciales émotionnelles des agents. Ces recherches s'accordent pour spécifier qu'il y a un impact de l'expressivité de l'agent sur les réponses émotionnelles de l'utilisateur (activité musculaire du visage). Ainsi, le mimétisme facial, facteur de l'empathie affective, existe lorsque l'utilisateur est face à la joie de l'agent [Ravaja *et al.*, 2016]. Aussi, Weyers *et al.* [2006] indiquent que l'utilisateur réagit également à la colère exprimée par l'agent. Dans la lignée des études précédentes, Philip *et al.* [2018] ont également étudié les réactions faciales rapides de l'utilisateur face à des stimuli émotionnels générés par les agents virtuels. Ces réactions sont considérées comme des réponses automatiques du visage et se produisent rapidement lorsque les expressions du visage sont présentées aux participants. La vision du visage de l'agent heureux a provoqué une activation du muscle zygomatique (*zygomaticus major*) du participant, tandis que la vision du visage en colère a produit l'activation du muscle corrugateur du sourcil (*corrugator supercilii*) de l'utilisateur. Ils ont constaté que les participants présentent une réaction faciale congruente aux expressions faciales émotionnelles des agents, soit une forme de mimétisme. Une seconde étude de Philip *et al.* [2017] a également montré l'importance de

la prise en considération du contexte car les réactions faciales rapides peuvent être modulées selon le contexte et le type d'expressions faciales émotionnelles présentées.

Concernant l'expressivité de l'agent, Paiva *et al.* [2017] indiquent « *le degré d'expressivité de l'état affectif de la cible est également important, car il constitue un indice fondamental pour que le processus d'empathie se produise. Cet aspect est crucial, surtout si l'agent a une apparence humaine. Les comportements non-verbaux peuvent également contribuer à susciter le mimétisme ou l'activation de réseaux de neurones partagés chez l'observateur humain et doivent être conçus ou générés en conséquence.* » (notre traduction). Comme évoqué précédemment, les expressions faciales sont essentielles pour l'expression des émotions, cette notion est centrale dans nos travaux de recherche.

Enfin, les capacités mentales, la morale, la personnalité de l'agent ainsi que le vécu qui lui est attribué peuvent inciter ou limiter l'apparition de réponses empathiques chez l'utilisateur. En effet, si l'agent a un comportement contraire à la morale de l'utilisateur, la mise en place d'une relation empathique semble restreinte. Les recherches de Hall indiquent que l'utilisateur est plus enclin à porter de l'affection à un personnage s'il affiche une morale et un comportement approprié, en comparaison à un personnage socialement inacceptable [Hall *et al.*, 2005b]. C'est également le cas si l'agent a un comportement froid et distant alors que l'utilisateur tentait d'établir une relation amicale. Cela est source de déception pour l'utilisateur [De Rosis *et al.*, 2005]. Ces comportements inadéquats ont pour conséquence de limiter les réactions empathiques. Ces études concordent avec les recherches de Coulson *et al.* [2012] qui précisent que l'attachement des utilisateurs envers les agents provient en partie de leur personnalité. De fait, l'étude de Siddique *et al.* [2017] démontre que les utilisateurs différencient et sont sensibles aux personnalités des agents. Il recommande d'adapter la personnalité de l'agent afin de faciliter les interactions et de développer un lien affectif.

Ainsi, il est recommandé de prendre en compte les différentes caractéristiques de l'agent virtuel afin de faciliter l'apparition de réponses empathiques chez l'utilisateur.

- **Modulation de l'empathie**

Le dernier élément à prendre en considération afin de permettre la mise en place d'une situation empathique est la modulation empathique. Cette modulation peut intervenir en fonction de l'émotion exprimée par l'agent, de l'utilisateur, ou des relations entre ces derniers [Boukricha, 2013; De Vignemont et Singer, 2006; Paiva *et al.*, 2017] :

- Modulation en fonction des caractéristiques de l'émotion observée

La réponse empathique de l'utilisateur est influencée par l'émotion exprimée par l'agent.

Dans ses travaux consacrés au modèle computationnel de l'empathie, Rodrigues *et al.* [2015] caractérisent l'émotion exprimée selon son type, sa valence, son intensité ainsi que sa cause. Le type décrit l'émotion (joie, colère, etc.), la valence indique si c'est une émotion positive ou négative, l'intensité décrit les degrés de l'émotion, et la cause est en lien avec un événement déclencheur. Chacune de ces caractéristiques de l'émotion peut avoir une incidence sur l'intensité des réponses empathiques de l'utilisateur. De plus, il est plus facile pour l'utilisateur de s'identifier lors de l'observation d'une émotion primaire que d'une émotion secondaire [De Vignemont et Singer, 2006]. Enfin, plus l'émotion exprimée par autrui est intense, plus la réaction empathique de l'individu sera intense [Hoffman, 2001].

- Modulation en fonction de l'utilisateur

Comme évoqué précédemment, les caractéristiques de l'utilisateur peuvent impacter sa capacité à se mettre à la place de l'agent. Ces caractéristiques sont personnelles, et certaines sont difficilement considérables pour un ensemble d'utilisateurs. Toutefois, elles peuvent directement influencer l'induction de réponses empathiques.

La personnalité de l'utilisateur est étroitement liée à ses réactions émotionnelles et empathiques [Melchers *et al.*, 2016]. Cela détermine les prédispositions de l'utilisateur à ressentir ainsi qu'à exprimer de l'empathie. La personnalité influence aussi l'intensité de la réponse. Nous pouvons supposer par exemple qu'un utilisateur introverti exprimera discrètement son empathie; une personne de nature méfiante aura du mal à faire confiance à un agent virtuel et à développer une relation avec l'agent, etc.

Enfin, l'humeur est un des facteurs de modulation de l'empathie pour les interactions humaines [De Vignemont et Singer, 2006] ainsi que pour les interactions humain-machine [Rodrigues *et al.*, 2015]. L'état émotionnel ou l'humeur du participant peut avoir une incidence sur son expérience et sur sa réponse empathique envers l'agent. L'utilisateur sera plus ou moins enclin à être empathique et réceptif aux expressions émotionnelles de l'agent. Selon la situation et le contexte mis en place, l'utilisateur calme et serein sera potentiellement plus enclin à ressentir de l'empathie qu'un utilisateur anxieux et septique.

- Modulation en fonction des relations entre l'agent et l'utilisateur

Comme lors des interactions humaines [De Vignemont et Singer, 2006; Hoffman, 2001], l'apparition de réponses empathiques de l'utilisateur envers l'agent dépend de la relation existante. Ce lien peut renforcer ou diminuer l'intensité de la réponse empathique [Rodrigues *et al.*, 2015]. Un fort lien affectif avec l'agent favorise l'identification avec celui-ci. Toutefois, afin de créer un lien affectif, l'agent doit paraître en capacité d'établir et de maintenir des

relations sociales [Paiva *et al.*, 2017]. En plus du lien affectif, le sentiment de similarité peut influencer l'utilisateur. C'est un facteur de modulation d'empathie évoqué par De Vignemont et Singer [2006] et Davis [1994]. Cette similarité peut concerner une ressemblance dans le comportement, l'histoire personnelle, les émotions ou encore concernant l'apparence. Plus la similarité semble importante, plus la réponse empathique sera forte. Hall a étudié ce phénomène avec des agents virtuels représentant des enfants victimes de harcèlement scolaire (FearNot!). Les résultats de cette étude indiquent que si les enfants perçoivent qu'ils sont similaires aux agents ayant un rôle de défenseur, il y a une plus grande empathie qui est exprimée [Hall *et al.*, 2005b]. Parmi les critères de similarité des agents, les enfants étaient également sensibles au genre. De plus, le réalisme comportemental ainsi que la confiance et la crédibilité accordées à l'agent virtuel favorisent le sentiment de similarité. Hall *et al.* [2005b] précisent que la perception d'un agent auquel on peut s'identifier, que ce soit au travers d'une similarité visuelle ou comportementale, est un des facteurs permettant d'apprécier l'agent et de devenir empathique avec sa situation ou ses actions.

La similarité peut aussi être liée aux origines ethniques ou culturelles. Maldonado et Hayes-Roth [2004] démontrent l'importance de faire correspondre, d'un point de vue visuel et comportemental, l'agent avec la culture qu'il représente. La similarité peut également être liée à une situation et au rôle attribué à l'utilisateur. Cela peut être le cas si l'utilisateur fait face à une situation qui lui semble similaire à ce qu'il connaît, par exemple si un professionnel de santé prend en charge un patient virtuel au sein d'un simulateur.

Paiva *et al.* [2005, 2004] ont également mené des recherches sur cette similarité et le facteur de proximité grâce à FearNot!. En se basant sur la littérature et les interactions humaines, ils relatent que les individus sont plus empathiques lorsqu'ils partagent une relation (ex : amitié, amour, famille). Afin qu'un agent provoque l'empathie, les utilisateurs doivent se sentir proches du personnage. Les résultats de ces études révèlent que la conception de personnages, visant des interactions pédagogiques empathiques, doit être conçue de manière à ce que les utilisateurs ressentent un certain degré de familiarité et de proximité avec l'agent, en adaptant son comportement et son apparence physique, ainsi qu'avec l'environnement et les situations chargées d'émotions. Concernant le sentiment de similarité liée à l'apparence de l'agent, les résultats de l'étude de [Ferstl *et al.*, 2016] démontrent que les utilisateurs ont une préférence envers les agents qui possèdent des caractéristiques visuelles réalistes. En effet, les utilisateurs préfèrent les agents virtuels avec des yeux de taille moyenne, par rapport à des agents avec de grands yeux, qui peuvent sembler étranges. Ferstl *et al.* [2016] évoquent un sentiment de familiarité lié au fait que les agents dotés de caractéristiques réalistes sont semblables aux humains réels.

La familiarité liée aux visages peut également influencer l'utilisateur. Des circuits neuro-naux sont spécifiquement activés lorsqu'un individu regarde un visage familier. Si un visage possède des traits communs avec un visage familier, les mêmes circuits neuronaux sont activés et l'individu lui associe automatiquement les mêmes traits de personnalité [Gamond *et al.*, 2011]. Il est important de noter que cette similarité faciale augmente l'implication des participants [Vugt *et al.*, 2010]. Enfin, lors de la conception d'un agent, les vêtements et les accessoires participent à la personnalité et au rôle de l'agent pour aider l'utilisateur à comprendre et à identifier les facettes de l'agent et la situation dans laquelle il est immergé [Maldonado et Hayes-Roth, 2004]. Ces éléments doivent être pris en compte, car ils peuvent affecter le sentiment de similarité et impacter les réactions empathiques de l'utilisateur.

Pour conclure et dans le but de faciliter la compréhension, nous avons synthétisé et illustré l'ensemble des facteurs que sont les mécanismes de l'empathie, la situation et le contexte, les caractéristiques de l'agent, les caractéristiques de l'utilisateur et la modulation de l'empathie, pouvant influencer la mise en place d'une situation favorisant les réponses émotionnelles et empathiques de l'utilisateur (Figure 2.22).

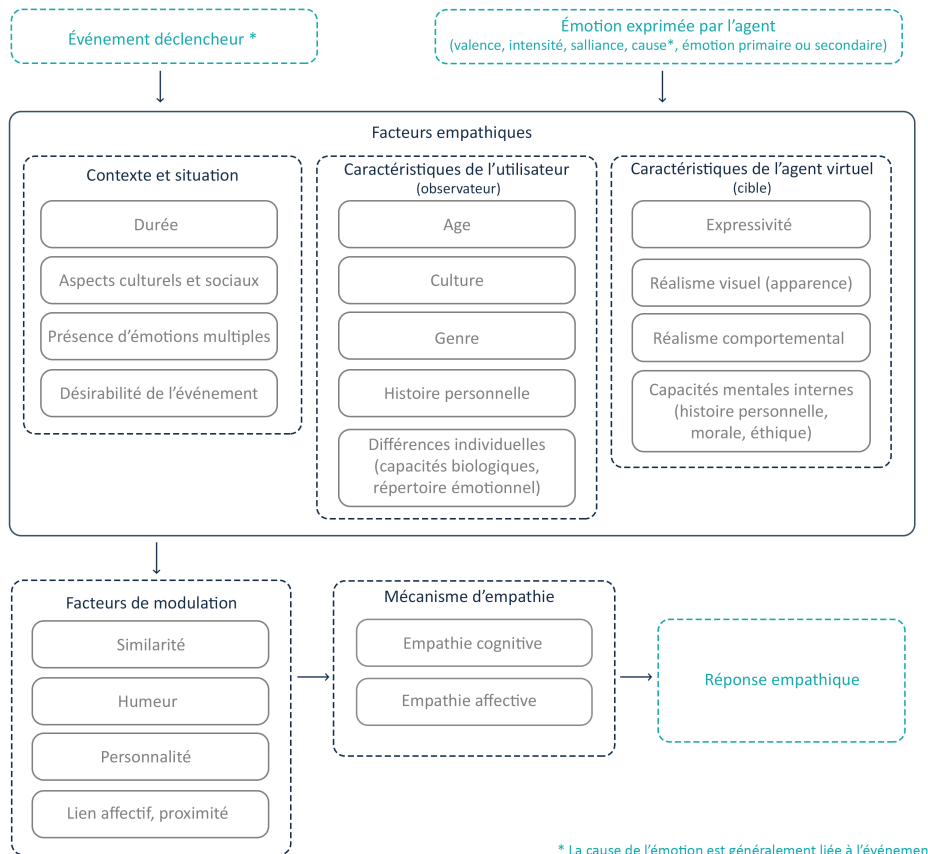


FIGURE 2.22 – Synthèse des principaux facteurs impliqués dans la mise en place d'une situation empathique

2.4.3 Induire de l'empathie à l'aide des agents virtuels

Afin d'étudier l'induction d'empathie chez les utilisateurs, des chercheurs ont proposé des expériences ayant pour but une projection, une prise de conscience ou encore la compréhension des sentiments d'autrui. Ces recherches ont permis d'analyser les facteurs cités en amont et d'étudier les impacts des agents sur les interactions humain-machine.

Évoqué précédemment, le projet FearNot! (*Fun with Empathic Agents to Reach Novel Outcomes in Teaching*) dédié aux enfants de 8 à 12 ans, a fait l'objet de diverses recherches sur l'empathie. L'objectif de la recherche de Hall [2005] est de déterminer si les utilisateurs ressentent de l'empathie face à un personnage qui souffre. Les résultats démontrent que les utilisateurs comprennent effectivement la douleur de l'agent. Hall *et al.* ont également analysé l'engagement empathique de l'utilisateur, les résultats indiquent que les réactions empathiques sont plus nombreuses lorsque les enfants ont un intérêt élevé pour leurs échanges avec les agents, et s'ils croient que leurs interactions ont un impact sur leurs comportements [Hall *et al.*, 2005a, 2006] (Figure 2.23a).

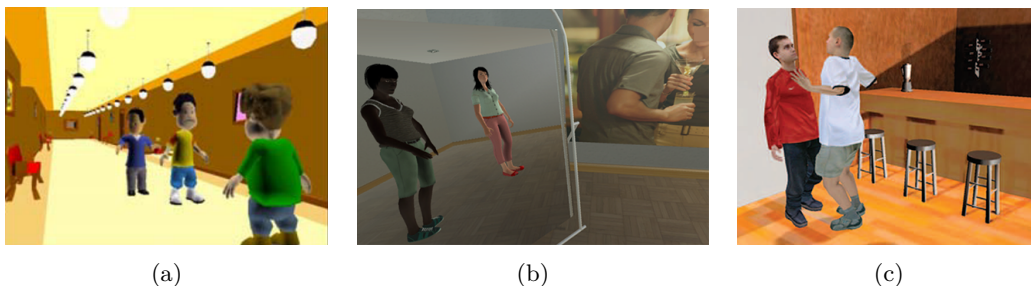


FIGURE 2.23 – Illustration des projets analysant la similarité et l'appartenance à un groupe comme facteur d'empathie. a) Projet FearNot! [Hall *et al.*, 2005b], b) Projet de Hasler *et al.* [2017], c) Projet de Slater *et al.* [2013]

Marsella *et al.* [2000] ont également étudié l'identification et la similarité. Leur projet a pour but d'aider les mères d'enfants atteints d'un cancer. Ils utilisent l'histoire personnelle ainsi que le sentiment d'identification avec l'agent et la situation. L'interaction comprend un échange entre Carmen la mère (agent contrôlé par l'utilisateur) et une conseillère virtuelle Gina. L'objectif de l'application est d'aider à gérer le stress de la participante en discutant avec l'agent de stratégies pour faire face à différentes situations. L'empathie a un rôle important dans ce type d'applications et a été induite notamment grâce au scénario et à l'identification.

Hasler *et al.* [2017] ont également utilisé la similarité afin d'étudier l'apparition de comportements mimétiques chez les utilisateurs. Dans leur projet, Hasler *et al.* [2017] ont travaillé avec des participants possédant soit un corps virtuel de type caucasien ou un corps virtuel de

type afro-américain. Lorsqu'ils étaient représentés avec un corps virtuel afro-américain, les participants caucasiens considéraient leur partenaire virtuel afro-américain comme s'il était membre de leur groupe et le partenaire caucasien était considéré comme un membre extérieur au groupe. Il est important de préciser que cet effet s'est produit en fonction du corps virtuel, et non du corps réel des participants. Le fait de se considérer du même groupe d'appartenance est favorable et augmente le mimétisme (Figure 2.23b).

Slater *et al.* [2013] ont également travaillé sur les groupes d'appartenance et la similarité. Il confronte un agent virtuel incarnant un supporter d'une équipe de sport à un agent violent, supporter de l'équipe adverse. Si l'utilisateur partage la même identité sociale que la victime, c'est-à-dire qu'ils sont supporters de la même équipe, la probabilité qu'il intervienne augmente, car ils ont le même groupe d'appartenance. Il a un sentiment de similarité et potentiellement de l'empathie pour cet agent victime du supporter violent (Figure 2.23c).

Ces études ont permis d'étudier le sentiment de similarité et de confirmer que c'est un facteur important à considérer pour la mise en place d'une situation empathique.

Wächter *et al.* [2006] ont étudié la compassion envers les agents virtuels. Ils ont demandé aux participants de former un agent virtuel à une tâche et de le récompenser ou de le punir en conséquence. Il y avait deux sortes d'agents : un agent avec des réactions faciales et un sans. Les chercheurs supposaient que les participants confrontés aux agents expressifs puniraient moins et montreraient plus d'hésitations à punir. Toutefois, ce ne fut pas le cas, l'expressivité de l'agent n'est pas le seul facteur à prendre en considération pour induire de la compassion chez les utilisateurs. Ils ont également étudié les caractéristiques des utilisateurs et leur niveau d'empathie avant l'expérimentation. Il semble qu'il existe un lien entre le taux d'empathie des participants et la compassion démontrée envers l'agent. D'après Stevens *et al.* [2016], l'expressivité faciale est tout de même associée à une plus grande compréhension et à des taux plus élevés d'engagement de l'utilisateur. Des recherches démontrent également que l'attitude et la façon de s'exprimer de l'agent peuvent influencer l'utilisateur et favoriser ou limiter son implication émotionnelle [De Rosis *et al.*, 2005].

Afin d'analyser les réponses empathiques des utilisateurs, des chercheurs ont conçu des scénarios mettant en avant des problèmes sociaux, tels que le racisme ou la violence. Ces projets mettent en avant l'importance du contexte, de la situation, de l'histoire personnelle et de la personnalité de leur cible. Les travaux de Seinfeld *et al.* [2018] illustrent ces propos en se focalisant sur la prise en compte du vécu et de la personnalité de l'utilisateur. Ce projet porte sur les violences conjugales. Les utilisateurs de ce projet ont un profil précis, ce

sont des hommes coupables de violences domestiques. Au fil de l'expérience, le participant va être confronté à un agent virtuel violent et sera victime d'agressions et d'insultes (Figure 2.24). Cette étude a permis de démontrer que l'homme au comportement violent était plus empathique après cette expérience. Il s'est projeté, mis à la place d'une personne agressée et a compris sa détresse et son état émotionnel. Avant l'expérience, plusieurs hommes coupables de violences domestiques, démontraient des difficultés dans la reconnaissance des émotions exprimées par une femme, notamment lors de l'expression de la peur. Après cette expérience, leur capacité à reconnaître l'émotion de peur semble s'être améliorée, d'où la prise de conscience et l'induction d'empathie. Grâce à un scénario adapté aux caractéristiques de la cible, des réactions empathiques sont apparues chez les utilisateurs.

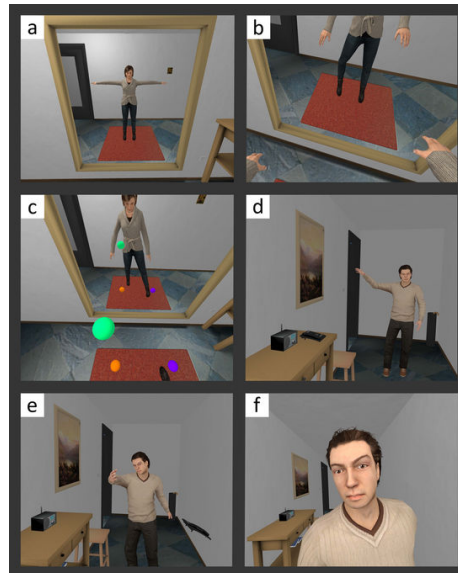


FIGURE 2.24 – Illustration du projet sur les violences conjugales de Seinfeld *et al.* [2018]. Lors de la première phase (a à c), le participant incarne une femme. Lors de la seconde phase (d à f), un agent violent apparaît et s'en prend à elle.

Les recherches d'Hasler *et al.* [2014] portent sur l'induction d'empathie chez les utilisateurs afin de combattre le racisme. Suite à la prise en compte des caractéristiques de l'utilisateur et notamment sa culture, Hasler *et al.* ont analysé l'utilisation des interactions humain-machine sur la résolution de conflits grâce à un scénario et des interactions abouties. Elle met en scène une confrontation entre un groupe israélien et un agent virtuel palestinien. Le fait que l'agent virtuel palestinien ait un comportement basé sur l'imitation a permis une identification et une acceptation par le groupe d'individus israéliens (Figure 2.25). Cela démontre l'impact du comportement, de la similarité ainsi que l'importance de la prise en compte des caractéristiques de l'utilisateur, notamment les origines culturelles.

FIGURE 2.25 – Illustration du projet de Hasler *et al.* [2014]

Enfin, Hall *et al.* [2011] et Mascarenhas *et al.* [2013] ont également travaillé sur le développement d'applications offrant la possibilité d'explorer les différences culturelles, ainsi que de développer la sensibilité interculturelle et l'empathie de l'utilisateur face à ces différences. Leurs projets offrent la possibilité de sensibiliser et découvrir des cultures à travers des interactions sociales avec des agents possédant des caractéristiques culturelles variées.

Pour conclure, ces projets de recherche ont permis l'analyse de l'induction de réponses empathiques au travers divers facteurs favorisant la mise en place d'une situation empathique entre l'utilisateur et l'agent virtuel. En se basant sur notre revue de littérature et suite à l'étude des facteurs d'empathie décrits précédemment, nous nous interrogeons sur l'impact des caractéristiques de l'agent virtuel et plus précisément sur l'effet des expressions faciales émotionnelles des agents sur les réactions empathiques de l'utilisateur.

Notions-clés de cette section :

- Les agents empathiques se définissent selon deux perspectives : des agents exprimant de l'empathie et des agents cibles d'empathie de l'utilisateur. Le périmètre de nos investigations se limite à la seconde perspective des agents empathiques : les agents cibles d'empathie.
- Les facteurs à prendre en considération pour la mise en place d'une situation empathique sont les mécanismes d'empathie, les caractéristiques de l'agent virtuel, les caractéristiques de l'utilisateur, la situation et le contexte ainsi que la modulation de l'empathie.

2.5 Agents virtuels induisant l'empathie : impact sur l'utilisateur et son expérience

Au travers des chapitres précédents, nous avons détaillé le contexte théorique de l'empathie. Nous avons également restitué un ensemble d'études concernant l'expressivité des agents virtuels ainsi que leur capacité à induire de l'empathie chez l'utilisateur, soit le périmètre de nos investigations. Ce dernier chapitre est dédié à l'impact des agents virtuels expressifs sur l'expérience utilisateur, et plus précisément concernant la présence sociale et l'engagement. Nous clôturerons ce chapitre avec une ouverture sur l'impact des agents virtuels expressifs sur l'apprentissage, notamment lors de leur intégration au sein de simulateurs en santé.

L'expérience utilisateur est définie par l'Organisation Internationale de Normalisation par la norme ISO9241-210 :2019⁸. Elle est présentée comme les « *perceptions et réactions d'un utilisateur qui résultent de l'utilisation effective et/ou anticipée d'un système, produit ou service. [...] Les perceptions et réactions de l'utilisateur incluent les émotions, convictions, préférences, perceptions, confort, comportements et réalisations de ce dernier qui interviennent avant, pendant et après l'utilisation. [...] Elle résulte également de l'état intérieur et physique de l'utilisateur résultant d'expériences passées, de ses attitudes, de ses compétences, de ses capacités et de sa personnalité, ainsi que du contexte d'utilisation* ». Cette définition prend en compte le caractère objectif et subjectif de l'expérience utilisateur. De nombreux chercheurs ont tenté d'apporter des modèles de l'expérience utilisateur, adaptés pour les interactions humain-machine. Ces modèles s'accordent sur l'importance des notions centrales que sont la présence et l'engagement [Pallot *et al.*, 2013; Tcha-Tokey, 2018; Wu *et al.*, 2009].

Sur la base de notre revue de littérature, nous pouvons constater que les agents virtuels expressifs impactent l'utilisateur, que ce soit un impact sur sa perception, son comportement ou encore sur le lien affectif l'unissant à l'agent. De ce fait, nous nous interrogeons sur leur impact sur des notions telles que la présence et l'engagement.

2.5.1 Les agents virtuels expressifs, l'engagement et la présence sociale

Dans cette sous-partie, nous allons définir synthétiquement la présence sociale et l'engagement, puis nous nous intéresserons à l'impact des agents virtuels expressifs sur le sentiment de présence sociale et l'engagement de l'utilisateur.

8. « Ergonomie de l'interaction homme-système — Partie 210 : Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs » <https://www.iso.org/fr/standard/77520.html>

Le sentiment de présence est communément défini comme le sentiment « d'être là » (*Being there*) [Slater *et al.*, 1994]. Il est associé à une réaction physique, physiologique et/ou émotionnelle de l'utilisateur, lui donnant la sensation que les événements, la situation et les objets sont réels, bien qu'ils se trouvent dans un environnement virtuel [Bouvier, 2009]. Ce sentiment peut être lié à l'environnement, aux interactions, mais également aux agents virtuels.

La présence sociale est décrite comme le sentiment d'être présent avec les autres (« *Being there with others* »). Ce sentiment peut notamment être généré à partir des interactions avec l'agent virtuel. La présence sociale provient du « *sentiment que l'on a un certain niveau d'accès ou de compréhension des états intentionnels, cognitifs ou affectifs de l'autre* » (notre traduction) [Biocca et Harms, 2002; Biocca et Nowak, 2001].

Biocca et Harms ont proposé une taxonomie afin de comprendre et identifier les composantes de la présence sociale [Biocca et Harms, 2002; Harms et Biocca, 2004] (Figure 2.26). Le niveau perceptuel de cette taxonomie est lié à la notion de co-présence, le participant est conscient de la présence des agents virtuels. Le niveau subjectif est basé sur la théorie de l'esprit dans le but de faciliter les interactions sociales (théorie précédemment définie dans la section 2.2). Enfin, le niveau intersubjectif correspond à une présence sociale mutuelle, elle peut être de deux sortes : la perception individuelle d'une présence sociale mutuelle ou la perception d'une présence sociale partagée.

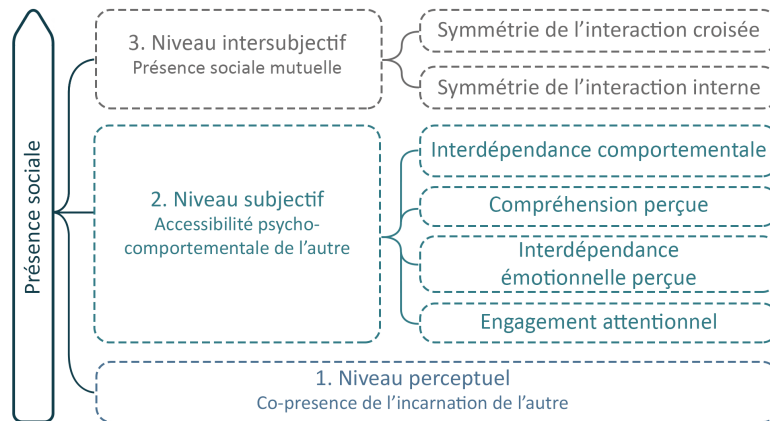


FIGURE 2.26 – Niveaux et dimensions de la présence sociale de Biocca et Harms [2002]

L'engagement, quant à lui, peut être défini et catégorisé selon trois dimensions : facial, empathique et utilisateur [Glas et Pelachaud, 2015]. L'engagement facial concerne les interactions sociales entre l'utilisateur et une entité virtuelle. Il est défini comme un processus par lequel deux ou plusieurs individus interagissent dans le but d'établir, de maintenir ou de mettre fin à leur relation [Sidner *et al.*, 2004]. L'engagement empathique correspond à une implication émotionnelle ayant pour but de créer une expérience cognitive et émotionnelle

cohérente qui aboutit à des relations empathiques entre l'utilisateur et un personnage de synthèse [Hall *et al.*, 2005a]. L'engagement défini par O'Brien est centré sur l'utilisateur, il est décrit comme la qualité de l'expérience utilisateur caractérisé par l'importance de son investissement cognitif, temporel, affectif et comportemental, lors d'interactions avec un système numérique [O'Brien *et al.*, 2018; O'Brien et Toms, 2008]. Enfin, dans le cadre des interactions humain-agent, Glas et Pelachaud [2015] ont retenu sept concepts en lien avec l'engagement : l'empathie, l'attention, l'intérêt, l'immersion, l'implication, la relation, et la posture (l'attitude, la position émotionnelle).

Suite à ces définitions, nous nous intéressons à présent aux liens existants entre la présence, l'engagement et l'empathie induite par les agents virtuels. Les recherches antérieures démontrent que l'utilisation d'agents virtuels expressifs et empathiques dans des environnements virtuels favorise le sentiment de présence des utilisateurs [Von Der Pütten *et al.*, 2009]. Il est intéressant de constater que dans le cadre d'applications pour l'apprentissage, cela augmente également leur sens de la participation [McQuiggan *et al.*, 2008]. L'intégration d'agents virtuels avec une apparence et une voix humaine influence la perception de présence sociale de l'utilisateur [Qiu et Benbasat, 2009]. Nowak et Biocca [2003] ont mené une étude dont les résultats démontrent que les individus réagissent socialement face à des agents virtuels. Cette étude met en avant le fait que le niveau de présence sociale est élevé lorsque l'utilisateur fait face à un agent représenté avec un niveau d'anthropomorphisme moyen, notamment par rapport au niveau d'anthropomorphisme élevé. Les agents avec un haut niveau de réalisme suscitent des attentes plus élevées qui mènent à une présence réduite si ces attentes ne sont pas comblées. Toutefois, ce résultat est potentiellement lié au phénomène de l'*Uncanny Valley*. Il serait intéressant d'effectuer de nouveau cette analyse avec des processus de conception contemporains.

Nicovich *et al.* [2005] soulignent que la présence et l'empathie sont deux notions distinctes mais proches, car elles dépendent de la capacité de projection indirecte de l'utilisateur. Ils soutiennent que la présence est étroitement liée à l'empathie et que de fortes tendances empathiques conduiront à une forte présence. La capacité d'empathie d'une personne affecte son degré de présence [Nicovich *et al.*, 2005]. Diemer *et al.* [2015] démontrent que dès qu'un scénario induit des réactions émotionnelles chez l'utilisateur d'une expérience en réalité virtuelle, le sentiment de présence augmente. Réciproquement, Shin [2018] indique que la présence est un fort facteur d'empathie et d'incarnation lors d'une expérience en réalité virtuelle. Les résultats de l'étude de Riva *et al.* [2007] démontrent une interaction circulaire entre la présence et les émotions, cela signifie que le sentiment de présence est plus important lors d'expériences

virtuelles avec un fort contexte émotionnel et que l'état émotionnel de l'utilisateur peut être influencé par le sentiment de présence.

L'intégration d'un agent virtuel a un également effet positif sur l'engagement de l'utilisateur lors d'un serious game [Gamage et Ennis, 2018]. Lorsqu'un participant fait preuve d'un niveau élevé d'empathie, il semble également engagé. Néanmoins, l'engagement ne signifie pas nécessairement que les participants sont empathiques [Glas et Pelachaud, 2015]. Il est intéressant de noter que la pertinence des actions de l'agent virtuel ainsi que sa capacité à dialoguer, son réalisme visuel et comportemental impactent le niveau d'engagement et de présence sociale de l'utilisateur [Conrad *et al.*, 2015; McQuiggan *et al.*, 2008; Nowak et Biocca, 2003; Van Vugt *et al.*, 2007]. En outre, les effets de la similarité entre l'agent et l'utilisateur peuvent favoriser l'engagement [Vugt *et al.*, 2010]. Fabri et Moore [2005] ont également mené une étude sur l'expressivité des agents virtuels. Les résultats démontrent qu'introduire une dimension émotionnelle enrichit l'expérience dans les environnements collaboratifs, en particulier pour induire de l'engouement et de l'engagement. Les recherches de Hall *et al.* [2006] indiquent également que des échanges affectifs peuvent apparaître entre l'agent et l'utilisateur, ce qui a pour conséquence de provoquer l'engagement empathique. Grâce à son engagement et son implication émotionnelle, l'utilisateur est en mesure de percevoir les émotions des agents virtuels et d'y apporter potentiellement une réponse appropriée. Enfin, il existe une forte relation entre le sentiment de présence et l'engagement lors de l'utilisation d'applications interactives [Brockmyer *et al.*, 2009]. C'est également le cas lors de l'utilisation d'outils numériques à but pédagogique, [Ngoyi *et al.*, 2014] indiquent que le sentiment de présence sociale impacte l'engagement des apprenants.

Ainsi, au regard de notre revue de littérature sur les agents virtuels, nous avons remarqué de potentiels liens qu'il conviendrait d'analyser entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement.

2.5.2 Les agents virtuels expressifs et l'apprentissage

Nous allons à présent nous intéresser à l'impact des agents virtuels expressifs sur l'apprentissage. Des recherches antérieures ont démontré qu'il était possible de former à l'aide d'agents virtuels expressifs. Il existe deux sortes d'agents pour la formation : les agents virtuels pédagogiques, qui sont dédiés à la formation, ils ont pour but d'encadrer, d'aider ou de conseiller au sein de l'application, ainsi que des agents virtuels dont le rôle dans l'application peut favoriser l'apprentissage au travers d'interactions. Les agents virtuels ont un effet positif sur l'apprentissage notamment pour faciliter la mémorisation d'information [Beun *et al.*, 2003; Dunsworth et Atkinson, 2007], ce phénomène est appelé « *Personae Effect* » [Lester *et al.*, 1997]. La présence des agents virtuels impacte l'apprentissage, notamment en favorisant la perception positive des apprenants à l'égard de l'agent, et augmente la performance d'apprentissage.

Un agent virtuel expressif favorise l'implication émotionnelle car l'utilisateur est immergé dans une situation émotionnelle forte. C'est un moyen efficace d'améliorer la mémorisation des contenus. Tyng *et al.* [2017] indiquent que « *les émotions ont une influence considérable sur les processus cognitifs chez les humains, notamment la perception, l'attention, l'apprentissage, la mémoire, le raisonnement et la résolution de problèmes* » (notre traduction). Ce dernier recommande l'utilisation de ces résultats, issus de la neuro-imagerie, pour la conception de programmes à visée pédagogique. Il est démontré qu'un agent virtuel expressif, intégré au sein d'applications dédiées à la formation, permet un meilleur apprentissage et une meilleure performance durant l'expérience, ainsi que pour des tâches post-expériences [Veletsianos, 2009].

Chaturvedi *et al.* [2015] ont analysé l'importance du réalisme visuel de l'agent virtuel dans le cadre de simulateurs, notamment dans le domaine médical. Il recommande de retranscrire avec précision l'apparence et les comportements humains chez l'agent virtuel pour susciter des réponses émotionnelles chez les participants. Cela permet de simuler des situations de la vie réelle à des fins de formation et d'éducation [Chaturvedi *et al.*, 2015]. Un agent virtuel peut donc être une aide efficace à l'apprentissage, entraînant un engagement accru et la mémorisation des connaissances. Il est néanmoins intéressant de noter que, lors d'un *serious-game*, le fait de personnaliser l'apparence du personnage par l'utilisateur a eu un impact négatif et a inhibé l'engagement [Gamage et Ennis, 2018]. Concernant la retranscription des comportements humains, des travaux antérieurs démontrent que la présence d'expressions faciales sur l'agent virtuel affecte positivement la motivation de l'utilisateur, son attitude,

sa perception, ainsi que son apprentissage [Baylor et Kim, 2009]. Enfin, l'humain virtuel doté d'émotions permettrait de diminuer le stress des participants et de mieux surmonter les difficultés [Prendinger *et al.*, 2005]. D'après les recherches de Gratch et Marsella [2001], les émotions des agents jouent un rôle important dans les environnements dédiés à la formation, car elles améliorent la crédibilité et le réalisme de l'agent notamment en augmentant le sentiment d'appartenance et le lien affectif développé envers l'agent.

Enfin pour conclure, Hall a démontré l'importance d'intégrer un agent virtuel favorisant l'empathie, car celui-ci permet d'évoluer dans un environnement sûr et rassurant pour l'utilisateur, où il peut explorer et apprendre à travers des expériences sociales [Hall *et al.*, 2006].

Former à l'aide d'agents virtuels expressifs intégrés au sein des simulateurs en santé

Il existe de nombreux bénéfices à l'intégration d'agents virtuels au sein de simulateurs en santé. Ces agents sont de plus en plus utilisés que ce soit à destination des professionnels de santé ou pour les patients. En effet, les agents peuvent représenter un professionnel de santé (agent médical virtuel) et mener des entretiens cliniques avec des patients. Les patients sont fortement engagés lors de leurs interactions avec l'agent virtuel, cela est principalement lié à une confiance et une acceptation élevées de l'agent [Philip *et al.*, 2020]. Lorsque les agents virtuels sont conçus dans le but de tenir le rôle d'un professionnel de santé et qu'ils se comportent comme tel, alors ils ont autant d'impact qu'un soignant réel [Ahn et Fox, 2017]. Une étude indique que certains patients seraient plus enclins à se confier à un soignant virtuel plutôt qu'à un réel professionnel de santé [Lucas *et al.*, 2014]. Les patients se sentent en confiance à parler de leurs soucis de santé avec des agents virtuels possédant des capacités relationnelles [Bickmore et Cassell, 2001]. Ces agents sont également utilisés afin d'aider les patients dans le processus thérapeutique, par exemple pour améliorer l'observance [Kenny *et al.*, 2008], pour la gestion du stress et des traumatismes [Rizzo *et al.*, 2011], pour lutter contre les phobies telles que la phobie sociale [Herbelin, 2005], pour aider les enfants autistes [Moore *et al.*, 2005] ou encore pour aider des patients à lutter contre la schizophrénie [Craig *et al.*, 2017].

Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrons sur les agents virtuels représentant des patients, afin de parfaire les formations des professionnels de santé, notamment en créant des interactions sociables crédibles avec ces patients virtuels. Cela a pour objectif d'aider les soignants à se former, à développer des compétences dans la réalisation d'un diagnostic ou de soins, ou à acquérir des compétences communicationnelles. Ces simulateurs proposent des situations réalistes permettant aux apprenants de se préparer à la prise en charge d'un patient. Certains simulateurs fournissent même un niveau de stress similaire à des prises en

charges authentiques, permettant d'approcher les conditions réelles [Robb *et al.*, 2013].

De plus, ce type d'agent virtuel facilite l'amélioration des compétences communicationnelles. Ils permettent une meilleure préparation à la rencontre d'un patient [Cordar *et al.*, 2014; Johnsen *et al.*, 2005; Kenny *et al.*, 2007]. À titre d'exemple, le projet MPathic VR a pour but d'entraîner et d'évaluer les compétences en communication du professionnel de santé [Kron *et al.*, 2017]. Durant l'exercice, l'étudiant doit interpréter les comportements verbaux et non-verbaux de son patient, et utiliser diverses stratégies de communication. Les choix conversationnels et les comportements de l'étudiant sont enregistrés et permettent une variation du comportement de l'agent virtuel. Les apprenants doivent comprendre et interpréter le comportement des agents afin de pouvoir répondre de la façon la plus appropriée et empathique.

Des recherches récentes ont également démontré que les patients virtuels pouvaient simuler un entretien psychiatrique réaliste, ayant pour but de former et évaluer les étudiants en médecine qui mènent ce type d'entretien [Dupuy *et al.*, 2020]. Les patients virtuels permettent également de simuler un entretien avec un médecin en charge de lui annoncer un événement indésirable tel qu'une maladie grave [Ochs et Blache, 2016]. Cet exercice est difficile pour les professionnels de santé, d'où l'importance d'être formé en amont. Les étudiants considèrent que les simulateurs sont de bons outils d'apprentissage, notamment pour s'entraîner à délivrer de mauvaises nouvelles [Andrade *et al.*, 2010]. Les échanges avec les agents virtuels ont été jugés plus empathiques que ceux avec des patients standardisés (méthode classique d'apprentissage avec un acteur) [Andrea Kleinsmith, 2015]. Cependant, suite à l'entraînement avec des patients virtuels, les apprenants rencontrant un patient standardisé, lui ont exprimé plus d'empathie et étaient plus susceptibles d'établir une relation [Borish *et al.*, 2014].

Afin d'accroître les compétences en communication, Riess et Kraft-Todd [2014] ont fourni un moyen mnémotechnique aux professionnels de santé avec le mot empathie (*E : eye ; M : muscles of facial expression ; P : posture ; A : affect ; T : tone of voice ; H : hearing the whole patient ; Y : your response*). Cela permet d'initier les professionnels de santé à la reconnaissance des facteurs d'expressivité des patients. Riess et Kraft-Todd [2014] recommandent de prendre en compte ces caractéristiques du patient afin d'y apporter une réponse appropriée. Cette liste est un bon indicateur des éléments à considérer pour la conception de simulateurs intégrant des patients virtuels, dans le but d'accroître l'empathie de l'utilisateur.

Enfin, l'intégration de patients virtuels réalistes et expressifs permet d'obtenir des environnements d'apprentissage qualitatifs, afin de s'entraîner sans risque, de répéter, de prendre le temps de réfléchir, ainsi que de mettre en pratique les connaissances et les compétences en communication des professionnels de santé auprès des patients virtuels [Danforth *et al.*,

2009; Deladisma *et al.*, 2007]. Suite à leur expérimentation sur les compétences en communication, Johnsen *et al.* [2005] ont d'ailleurs soulevé que les étudiants en médecine souhaitent s'entraîner davantage avec des agents virtuels avant de rencontrer des patients standardisés ou des vrais patients.

Comme évoqué dans l'introduction de ce manuscrit, il est nécessaire de développer les capacités d'empathie, d'écoute et de disponibilité du soignant, car elles sont essentielles pour permettre une bonne prise en charge du patient [Vannotti, 2002]. Une communication empathique du soignant peut amenuiser la perception de la douleur des patients [Fauchon *et al.*, 2019]. Ainsi, les agents virtuels expressifs semblent être un outil parfaitement adapté pour se préparer à la rencontre d'un patient et parfaire les compétences en communication des professionnels de santé. En effet, la conception de simulateurs en santé a pour objectif de former dans des conditions optimales et s'approchant au maximum de la réalité, afin d'encourager la mémorisation et l'apprentissage.

Notions-clés de cette section :

- L'agent virtuel expressif impacte l'expérience utilisateur, notamment l'engagement et le sentiment de présence de l'utilisateur.
- Il existe une relation entre les notions d'engagement, de présence sociale, d'empathie et les agents virtuels.
- Les agents virtuels expressifs favorisent l'implication émotionnelle de l'utilisateur. Cela permet d'aboutir à une meilleure mémorisation et un meilleur apprentissage.
- L'utilisation de patients virtuels expressifs permet l'amélioration des simulateurs dédiés à la formation des professionnels de santé.

2.6 Synthèse de l'état de l'art et poursuite des travaux

Nous avons débuté notre revue de littérature en introduisant le contexte théorique de l'empathie et de ses composantes. Nous avons décrit le lien unissant l'empathie et les émotions. Puis, nous avons présenté synthétiquement les différentes théories des émotions et décrit les méthodes existantes pour mesurer les réactions émotionnelles et empathiques d'un individu.

Nous sommes ensuite entrés au cœur de notre sujet, en définissant la notion d'agent virtuel expressif, et en détaillant les techniques permettant la retranscription et la reconnaissance des émotions sur ce dernier. Nous avons évoqué l'importance du réalisme visuel et comportemental des agents. Cette section a permis de détailler les différentes façons de concevoir un agent virtuel réaliste et expressif. Ces techniques sont en perpétuelle évolution, et permettent ainsi des niveaux d'expressivité, de réalisme comportemental et visuel fidèles à la réalité. Enfin, nous avons analysé l'impact des agents virtuels expressifs sur l'interaction humain-machine.

Par la suite, nous nous sommes concentrés sur l'empathie émanant d'interactions avec les agents virtuels. Nous avons défini la notion d'agents virtuels empathiques et détaillé la mise en place d'une situation empathique entre l'utilisateur et l'agent. Ainsi, nous avons caractérisé les facteurs intervenant dans l'induction d'empathie chez l'utilisateur. Pour conclure cette partie, nous avons analysé les projets ayant étudié les divers facteurs d'empathie.

Enfin, nous avons décrit l'impact des agents virtuels expressifs sur la présence sociale et l'engagement de l'utilisateur, puis nous avons également établi un lien entre les agents virtuels expressifs et l'apprentissage. Pour finir, en adéquation avec le domaine d'application de nos recherches, nous avons brièvement présenté les études intégrant des agents virtuels dans des simulateurs dédiés à la formation des professionnels de santé.

Suite à notre revue de littérature, nous avons souhaité contribuer à l'amélioration des recommandations concernant l'expressivité des agents virtuels conçus à partir de techniques avancées de modélisation. Si de nombreuses études ont porté sur l'expressivité des agents virtuels, peu concernaient des agents créés grâce à la photogrammétrie. De plus, il est nécessaire d'étudier et d'intégrer les divers facteurs d'expressivité faciale humaine afin de pouvoir retranscrire les émotions sur un agent virtuel réaliste. L'objectif est d'améliorer et de contrôler l'expressivité de l'agent ainsi que de parfaire les interactions humain-machine. Au terme de notre revue de littérature, nous avons donc établi notre première question de recherche :

Q1 : L'évolution des processus de conception des agents virtuels, comprenant l'amélioration du réalisme visuel et l'intégration de facteurs d'expressivité humaine, favorise-t-elle la reconnaissance des émotions ?

Pour cela, nous nous sommes basés sur les recommandations antérieures et nous avons exploré l'intégration de facteurs d'expressivité au sein de notre première expérimentation. L'un des objectifs de ces travaux est d'évaluer l'impact de l'expressivité des agents virtuels en proposant un rendu visuel et comportemental réaliste. Ainsi, suite à l'analyse et l'évaluation de l'expressivité des agents virtuels, notamment en mesurant le taux de reconnaissance des émotions de base, nous poursuivrons nos travaux en analysant l'impact de l'expressivité des agents virtuels sur l'empathie des utilisateurs. La reconnaissance des expressions d'émotions sur ces nouveaux modèles issus de scans 3D et intégrant des facteurs d'expressivité est le liminaire à l'étude de l'empathie, afin d'éviter un biais inhibant potentiellement l'induction d'empathie chez l'utilisateur. Ceci fait, nous pourrions répondre à notre seconde question de recherche, décomposée selon deux axes.

Q2.1 : Quel est l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur ?

Afin de répondre à cette deuxième question de recherche, nous avons mis en place une étude empirique dans le but d'évaluer l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur. Cette étude s'inscrit au sein d'un simulateur en santé dédié à la formation des professionnels de santé, et intègre un agent virtuel expressif ou non expressif selon les conditions expérimentales.

Suite à notre état de l'art démontrant une relation entre la présence d'agents virtuels et les notions d'engagement, d'empathie et de présence sociale, nous avons étendu nos recherches en ajoutant une nouvelle question de recherche (Q2.2). Dans la continuité de la question précédente, cette question de recherche a pour but d'analyser l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur la présence sociale et l'engagement.

Q2.2 : L'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte-t-elle l'engagement et le sentiment de présence sociale de l'utilisateur ?

Pour conclure, les travaux menés dans le cadre de cette thèse, et qui seront présentés au sein des chapitres suivants, nous permettront ainsi de répondre à l'objectif de ce travail de thèse, qui est de fournir des recommandations concernant l'expressivité d'un agent virtuel réaliste afin de favoriser la mise en place d'une situation empathique entre l'utilisateur et l'agent.

Chapitre 3

Expérimentation 1 : Reconnaissance des émotions sur un humain virtuel

Sommaire

3.1	Résumé	84
3.2	Présentation de l'expérimentation	85
3.3	Matériel et méthodes	86
3.3.1	Application	86
3.3.2	Participants	90
3.3.3	Procédure	90
3.3.4	Mesures	92
3.3.5	Hypothèses	93
3.4	Résultats	94
3.4.1	Reconnaissance des émotions et confusions	94
3.4.2	Analyse de la reconnaissance des émotions	96
3.4.3	Impact de l'absence de la variation de la taille des pupilles	98
3.4.4	Impact de l'absence des rides d'expression	99
3.4.5	Acceptabilité, expressivité et exagération	100
3.5	Discussion	103
3.5.1	Reconnaissance des émotions de base sur un humain virtuel	103
3.5.2	Reconnaissance des émotions sur les humains virtuels et l'humain réel	103
3.5.3	Impact de l'absence des rides d'expression et de la variation pupillaire sur la reconnaissance	105
3.5.4	Limites de l'étude	106
3.5.5	Introduction à la seconde expérimentation	106

3.1 Résumé

L'amélioration de l'expressivité des agents virtuels est essentielle afin d'obtenir des interactions qualitatives et le développement d'un potentiel lien affectif de l'utilisateur envers l'agent virtuel. Ces améliorations sont notamment conseillées pour toutes les applications faisant appel au processus cognitif de l'utilisateur, telles que des applications dédiées à la formation ou à la santé.

Notre étude a pour but de contribuer à la conception des agents virtuels expressifs en identifiant et en adaptant des facteurs visuels contribuant à la retranscription des émotions. Dans cette expérimentation, nous investiguons l'impact des rides d'expression et de la variation de la taille des pupilles en fonction de l'état émotionnel sur la reconnaissance des émotions. Nous proposons de comparer la reconnaissance des expressions d'émotions de base sur un humain réel et sur un humain virtuel expressif, afin d'analyser sa capacité d'expression. L'humain virtuel a été évalué selon trois modalités s'appuyant sur les deux facteurs cités précédemment : avec chaque facteur isolément (humain virtuel sans variation des pupilles et humain virtuel sans rides d'expression) et avec les deux facteurs simultanément.

Nos résultats révèlent que le taux de reconnaissance des émotions est élevé sur l'humain réel comme sur l'humain virtuel. Toutefois, les expressions de colère et surprise sont mieux reconnues sur l'humain réel. Nous n'observons pas de différence significative concernant la reconnaissance des émotions de base sur l'humain virtuel comparé à l'humain virtuel sans la variation de la taille des pupilles. C'est également le cas pour la comparaison de la reconnaissance des émotions entre l'humain virtuel et l'humain virtuel ne possédant pas de rides d'expression. Afin d'obtenir plus d'informations sur la reconnaissance des émotions, nous avons également pris en compte le niveau de certitude des participants lorsqu'ils donnent leurs réponses ainsi que leur temps de réponse. Ces variables présentent des différences significatives lors de la comparaison de l'humain réel et de l'humain virtuel pour les émotions de peur en faveur de l'humain virtuel, et de surprise en faveur de l'humain réel ; ainsi que lors de la comparaison entre l'humain virtuel et l'humain virtuel ne possédant pas de rides d'expression pour l'émotion de colère en faveur de l'humain virtuel.

Chaque émotion possède ses spécificités, cependant la reconnaissance de ces émotions sur l'humain virtuel expressif semble efficace. Au regard des résultats concernant la présence de facteurs visuels, tels que la variation des pupilles et les rides d'expression pour la conception d'agent virtuel expressif, nous préconisons des études complémentaires notamment en travaillant sur l'intensité de ces facteurs car nous supposons que cela pourrait impacter la reconnaissance des émotions.

3.2 Présentation de l'expérimentation

Afin d'étudier l'impact d'un humain virtuel réaliste et expressif sur l'induction d'empathie chez l'utilisateur, nous effectuons une première étude sur la retranscription des émotions sur le visage d'un humain virtuel. Comme l'illustre notre revue de littérature, il est important de prendre en compte que, pour favoriser les réactions empathiques, outre le réalisme et la similarité, la reconnaissance des émotions et des expressions faciales émotionnelles d'autrui est une composante essentielle à l'induction d'empathie [Besel et Yuille, 2010].

Nous avons répertorié différentes variables à paramétrer pour permettre la retranscription des émotions telles que : la durée de l'émotion, l'intensité, la présence de rides d'expression, la variation du diamètre pupillaire, le rougissement, le regard, etc. Chacune de ces variables est recensée et détaillée au sein de la littérature (voir Section 2.3.1), cependant, ce sont des réponses isolées. C'est pourquoi nous proposons une étude combinatoire comprenant deux de ces variables : les rides d'expression et la variation de la taille des pupilles, car nous supposons que leur présence joue un rôle dans la retranscription de chacune des émotions de base de l'agent virtuel, tel que pour un humain réel [Ekman, 2007; Hess, 1975].

Cette étude, par la combinaison de ces deux variables, évalue et détaille la retranscription et la reconnaissance des émotions sur un humain virtuel réaliste et expressif. Nous nous interrogeons sur le fait que cette combinaison permet plus d'expressivité et une meilleure reconnaissance des émotions sur l'humain virtuel par l'utilisateur. Nous avons procédé en comparant un humain réel et un humain virtuel doté des deux variables simultanément, afin de comparer si la reconnaissance des émotions s'effectue de manière analogue entre un humain réel et un humain virtuel, puis en comparant l'humain virtuel avec l'humain virtuel sans rides d'expression et avec l'humain virtuel sans variation de la taille des pupilles. La reconnaissance des expressions faciales émotionnelles s'est faite au moyen de séquences vidéo, aussi bien pour l'humain réel que pour l'humain virtuel. Les participants doivent reconnaître l'expression d'émotion affichée et indiquer leur niveau de certitude. Les émotions représentées sont les six émotions de base [Ekman et Friesen, 1978]. Enfin, les participants font part de leur retour d'expérience, notamment sur des difficultés à reconnaître les émotions ou encore sur le dérangement lié à la visualisation de certaines émotions, à l'aide d'un questionnaire post-expérimentation.

La prochaine section de ce chapitre 3.3 restitue l'analyse des données collectées. Les résultats sont discutés dans la partie 3.4, en amont d'une analyse critique et de la conclusion de cette première étude.

3.3 Matériel et méthodes

3.3.1 Application

Dans le cadre de cette expérimentation, une application a été développée à l'aide du moteur de rendu 3D temps réel Unity 3D¹. Cette application porte sur la reconnaissance des émotions de base à partir de vidéos selon quatre modalités :

- Humain réel : R
- Humain virtuel : V
- Humain virtuel sans variation de la taille pupillaire en fonction de l'état émotionnel : V-sP
- Humain virtuel sans les rides d'expression : V-sRE

Les séquences vidéo des émotions durent entre deux à cinq secondes selon l'émotion considérée (Annexe B.1). L'humain réel et l'humain virtuel présents dans l'application expriment les six émotions de base. Bien que controversées, les émotions de base sont régulièrement utilisées lors d'études en psychologie et en sciences cognitives. C'est pourquoi notre étude, concernant la reconnaissance des émotions par l'utilisateur, s'effectue sur ces six émotions qui sont : la colère, le dégoût, la peur, la joie, la tristesse, la surprise [Ekman, 2007; Ekman et Friesen, 1978]. Les vidéos de l'humain virtuel ont été réalisées en correspondance de celles de l'humain réel. Cela signifie que les vidéos de chaque expression d'émotion ont la même durée ainsi qu'un cadrage similaire : le personnage est de face en gros plan. Enfin, nous avons été attentifs à ce que les deux environnements autour de l'humain réel et de l'humain virtuel soient semblables et minimalistes afin de restreindre l'intérêt porté sur l'environnement et garder la focalisation sur les humains. Nous avons notamment ajouté le même fond bleu pour chaque condition, ainsi que des éclairages et des ombres similaires afin de ne pas influencer ni biaiser les réponses des participants à cause d'une différence d'éclairage [De Melo et Paiva, 2007; Wisessing *et al.*, 2016].

Choix de la représentation dynamique ou statique

Notre revue de littérature illustre des divergences quant au mode de représentation des émotions en statique ou dynamique. Plusieurs travaux préconisent des tests non-statiques, précisant qu'il est plus réaliste et plus reconnaissable de représenter les émotions dynamiquement [Kätsyri et Sams, 2008]. Philip *et al.* [2018] insistent également sur ces notions de dynamisme, d'émotion et de réalisme, notions principales dans notre expérimentation. Ainsi, nous avons opté pour une représentation dynamique des émotions.

1. Unity est un moteur de jeu multi-plateforme (PC, Mac, smartphones, consoles de jeux et web), développé par Unity Technologies. Il permet de créer des applications ou des jeux en 2D ou 3D.

L'humain virtuel

L'humain virtuel est conçu à partir de scans 3D², obtenus grâce à des techniques de photogrammétrie. L'acquisition de ces scans 3D a favorisé la conception d'un modèle 3D réaliste. Ne pouvant pas utiliser le scan en l'état, nous avons optimisé le maillage afin d'obtenir un modèle adapté pour du temps réel (maillage de basse résolution). Cette adaptation permet l'animation et l'intégration du modèle au sein du moteur de rendu 3D temps réel Unity 3D. Comme il est préconisé dans notre revue de littérature, nous avons également retravaillé la texture afin d'améliorer le rendu de la peau de notre humain virtuel. Nous avons gommé les imperfections dues au scan, ajouté des informations de transluminescence (SSS) et de grain de peau. L'intégralité de ce processus de conception de l'agent virtuel expressif est détaillée en Annexe A1.

L'obtention de scans 3D a également permis la création des Unités d'Actions sur le modèle, dans le but de retranscrire des émotions, basées le FACS [Ekman et Friesen, 1978]. Afin de créer les expressions faciales émotionnelles, nous utilisons un corpus issu de scans 3D comme référence, pour être utilisé avec une approche d'animation paramétrique à l'aide de *blendshapes*³ (voir Section 2.3.1).

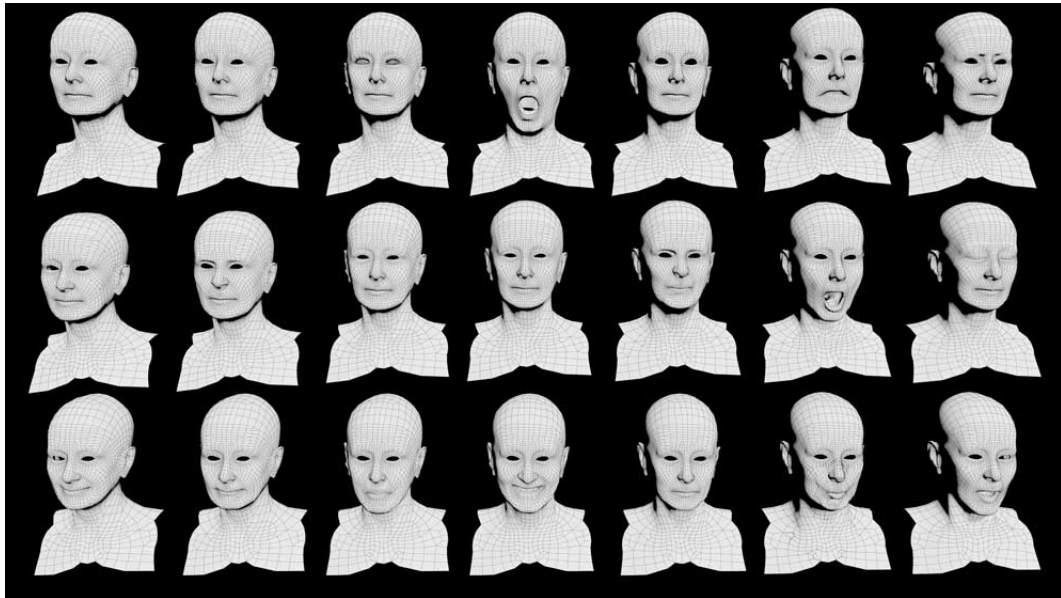


FIGURE 3.1 – Création des *blendshapes* à partir des Unités d'Action

2. Scans provenant du site 3D Scan Store - <https://www.3dscanstore.com/>

3. Les *blendshapes* permettent une interpolation entre deux formes du visage. Cette méthode consiste à posséder plusieurs fois le modèle 3D avec diverses expressions faciales. Pour ce type d'animation, le modèle de base est un modèle ayant une expression neutre. L'animation est réalisée par interpolation du modèle neutre et du modèle exprimant une émotion. L'activation des *blendshapes* transforme le visage neutre en un visage expressif.

Cet humain virtuel sera présent au sein de nos deux expérimentations. C'est pourquoi l'âge et le sexe de l'agent virtuel sont en adéquation avec le contexte médical et le scénario du simulateur utilisé dans la poursuite des travaux (Chapitre 4).

Concernant la présence des rides d'expression, nous utilisons des *wrinkle maps*, c'est-à-dire des textures contenant les informations de relief relatives aux rides (Figure 3.2), obtenues à partir des scans 3D et modifiées pour pouvoir être appliquées sur le modèle 3D. Les rides d'expression apparaissent et disparaissent en fonction de l'état émotionnel de l'agent. Les étapes de conception sont également détaillées en Annexe A1.



FIGURE 3.2 – Avant et après l'application d'une *wrinkle map* sur le modèle 3D

Afin de représenter les mouvements de contraction et de dilatation des pupilles selon l'état émotionnel, nous avons créé deux *blendshapes* (Figure 3.3). Leur activation permet la réduction ou l'agrandissement de la taille de la pupille (Annexe A1).



FIGURE 3.3 – Dilatation et contraction des pupilles

Enfin, suite à la conception de l'humain virtuel expressif, nous avons réalisé les vidéos représentant dynamiquement chacune des émotions de base. Ces vidéos ont été enregistrées directement au sein du moteur de rendu Unity 3D dans lequel nous avons constitué l'environnement et les animations d'expressions faciales émotionnelles de l'humain virtuel.

L'humain réel

Afin d'évaluer les émotions dynamiquement sur l'humain virtuel et sur un humain réel, et à défaut de posséder des vidéos d'émotions exprimées par la personne dont sont issus les scans 3D, nous avons opté pour l'utilisation d'une banque de vidéos dédiées à l'expression des émotions. Nous avons donc analysé différentes bibliothèques de vidéos en se basant sur les travaux de Krumbhuber *et al.* [2016]. Nous avons choisi de nous référer à la bibliothèque de vidéos « MMI Facial Expression Database »⁴ [Pantic *et al.*, 2005; Valstar et Pantic, 2010]. Les vidéos et photographies fournies représentent soit les émotions de base, soit la contraction de muscles faciaux désignés selon le nommage des Unités d'Action.



FIGURE 3.4 – Extraits issus de la bibliothèque MMI

Au sein de la bibliothèque, les extraits vidéo d'une femme exprimant les émotions de base et basée sur le FACS, ont été sélectionnés (Figure 3.4). Le choix d'un personnage féminin a été effectué en adéquation avec le scan 3D ayant permis la création de l'agent virtuel expressif et réaliste. Concernant l'expression des émotions, au début de chaque vidéo, la femme a une expression neutre, puis elle exprime l'émotion, et enfin elle revient en position neutre (soit les phases : *neutral, onset, apex, offset, neutral*) (voir section 2.2.2).

Équipement et conditions d'expérimentation

L'application est exécutée sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core I7-6700HQ @2.60GHz et d'une carte graphique Nvidia GeForce GTX 1060. La définition est de 1920x1080 pixels. Cet ordinateur est disposé dans un environnement contrôlé permettant au participant de se focaliser sur l'expérimentation. Les participants effectuent l'étude isolément. Afin de respecter une zone de confidentialité et ne pas induire de stress altérant les réponses, chaque participant a un espace réservé, c'est-à-dire que l'écran n'est pas visible par l'expérimentateur.

4. <https://mmifacedb.eu/>

3.3.2 Participants

84 participants ont été recrutés pour notre expérimentation. Cette expérimentation ne nécessitait pas un profil spécifique de participant. Néanmoins, deux des participants ont été écartés de nos résultats, car ils ont déclaré être atteints de troubles neurologiques ou psychiatriques. Nous avons établi ces critères d'exclusion car cela peut altérer l'expérience de l'utilisateur et avoir des conséquences sur la reconnaissance des états émotionnels présentés. De ce fait, cela aurait pu biaiser les résultats. Nous avons donc 82 participants incluant 56 hommes et 26 femmes âgés de 20 à 52 ans ($M=28,23$; $SD=0,87$).

3.3.3 Procédure

Préalablement à l'expérimentation, le participant signe l'accord de confidentialité et d'utilisation des données. De plus, il est demandé au participant de signer un document renseignant s'il est atteint de troubles psychiatriques ou neurologiques, pouvant altérer les résultats comme indiqué précédemment.

Dans un second temps, le participant reçoit les instructions nécessaires à la passation. L'expérimentateur initialise et lance le scénario constitué d'une première phase de recueil d'informations, de tutoriel, puis la phase de reconnaissance des émotions. Au terme de ces phases, les participants complètent le questionnaire post-expérimentation. L'expérimentation suit un plan expérimental intra-sujet, tous les participants testent chaque condition : la reconnaissance des 6 émotions pour les 4 conditions (R, V, V-sP, V-sRE).

L'expérimentation dans sa globalité n'a pas de durée prédéfinie, cela est laissé à l'appréciation du participant. La variabilité du temps de passation repose sur la durée mise par le participant à visualiser les extraits, qu'il peut regarder plusieurs fois si nécessaire, et à répondre aux questions. Cependant, nous avons noté que chaque passation dure 10 à 15 minutes.

Phase 1 : Recueil d'informations

Dans un premier temps, le participant doit renseigner ses informations personnelles (genre, âge et profession) afin d'établir un recueil d'informations démographiques.

Phase 2 : Tutoriel

Cette phase est constituée d'un tutoriel vidéo expliquant le déroulement de l'expérimentation, le fonctionnement de l'application, ainsi que les tâches à effectuer par le participant. Le participant prend connaissance du fait que toutes les vidéos sont différentes et qu'elles sont

au nombre de vingt-quatre. Enfin, il est possible d’avoir plusieurs fois la même réponse. Lorsque le participant est à l’aise avec ces instructions, il peut démarrer la troisième phase.

Phase 3 : Reconnaissance des émotions

Lors de cette phase, le participant visualise de courtes séquences vidéo représentant des émotions (Annexe B.2). Pour chaque extrait vidéo, il renseigne l’émotion représentée et indique le niveau de certitude lié à sa réponse (Figure 3.5).

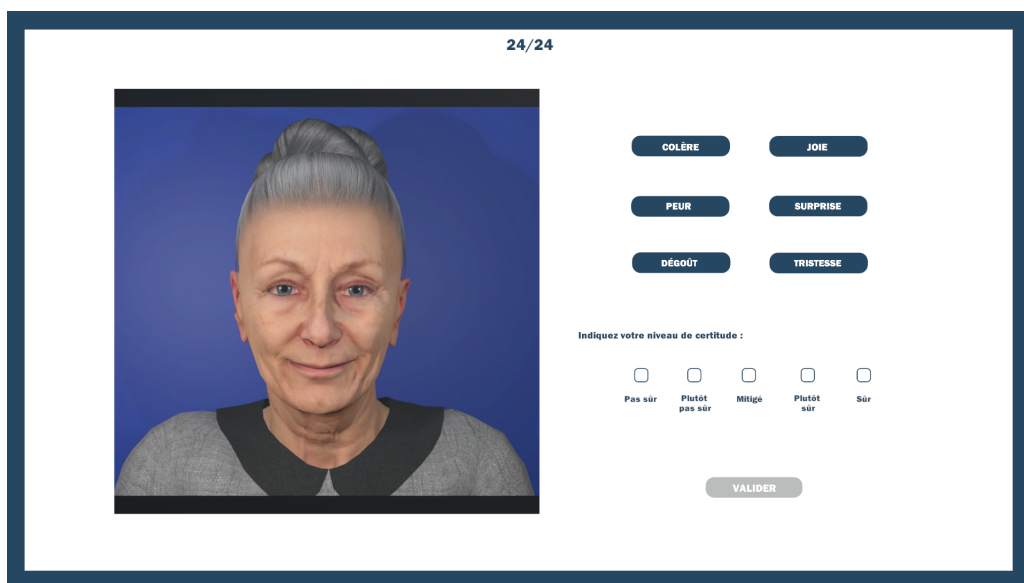


FIGURE 3.5 – Exemple de la phase de reconnaissance des émotions

Il y a donc vingt-quatre vidéos soit une vidéo pour chacune des six émotions de base, dans chacune des quatre conditions (R,V,V-sP,V-sRE). Enfin, l’ordre des séquences vidéo est aléatoire, et il ne peut y avoir plusieurs vidéos successives représentant la même émotion. Le participant visualise et analyse chacune des vingt-quatre vidéos, il n’est pas informé des informations relatives aux quatre conditions ni de l’ordre aléatoire des séquences vidéo.

Phase 4 : Questionnaire

À l’issue de cette phase de reconnaissance des émotions, le participant est convié à répondre à un questionnaire post-expérimentation ayant pour but de recueillir ses ressentis, notamment en ce qui concerne ses difficultés à la reconnaissance des émotions, son aisance avec les différents agents ou encore sa compréhension de l’application.

3.3.4 Mesures

Les données obtenues durant l'expérimentation reposent sur différentes mesures afin d'acquérir de nombreuses informations concernant la reconnaissance des émotions. Des données objectives sont recueillies à l'issue des passations, telles que le nombre de bonnes réponses, le nombre d'hésitations ou encore le détail de ces hésitations. Des données subjectives quantitatives sont également recueillies suite à l'évaluation de la certitude relative à chacune des réponses du participant. L'utilisateur n'a pas connaissance des informations recueillies concernant la véracité de sa réponse, le temps ou encore ses hésitations.

Toutes les données récupérées lors de la passation sont collectées via l'application dans un fichier CSV (*Comma-Separated Values*). Il existe un fichier par participant, indexé selon la date et l'heure. Il est ensuite constitué un fichier commun pour tous les participants, contenant les données suivantes :

— **Informations de chaque participant** : genre, âge, profession.

À la suite des informations du participant, il est inscrit dans notre tableau de données, pour chaque séquence vidéo :

- **Nom de l'émotion qui était représentée dans la séquence vidéo (E)**
- **Réponse du participant (R)** c'est-à-dire l'émotion que le participant a détectée parmi les émotions de base.
- **Véracité de la réponse (CE)** : il est inscrit dans notre tableau de données si la réponse du participant est correcte ou incorrecte.
- **Temps de réponse (T)** : ce temps correspond à la durée entre le début de la vidéo et la validation de la réponse par le participant. Cette durée n'a pas pour vocation d'être interprétée comme une performance, mais comme une indication sur le comportement du participant, par exemple si ce dernier a besoin d'un temps de réflexion supplémentaire, notamment en visualisant de nouveau la vidéo.
- **Niveau de certitude (C)** : le niveau de certitude est relatif à chaque réponse concernant la reconnaissance des émotions. Il est évalué à l'aide d'une échelle de Likert à 5 points⁵.
- **Nombre d'hésitations (NH)** : cela contient le nombre de clics effectués sur une autre émotion avant que le participant choisisse sa réponse.

5. L'échelle de Likert est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez des individus. C'est une échelle de jugement, répandue dans les questionnaires psychométriques, par laquelle la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation. L'échelle contient pour chaque item une graduation comprenant en général cinq ou sept choix de réponse qui permettent de nuancer le degré d'accord [Likert, 1932]

- **Détail de l'hésitation (H)**, intitulé des autres émotions sur lequel le participant a cliqué.

L'ensemble de ces informations ne sont pas communiquées au participant lors de l'étude. Enfin, le questionnaire post-expérimentation que nous avons conçu, est complété par le participant. L'objectif de ce questionnaire est de recueillir le ressenti subjectif des participants sur différents thèmes tels que l'expressivité, l'acceptabilité et l'exagération des émotions exprimées par l'humain virtuel et l'humain réel. La récolte de ces données permet de fournir des informations supplémentaires afin de mieux comprendre les choix du panel, d'illustrer nos résultats ainsi que d'alimenter notre discussion.

3.3.5 Hypothèses

Suite à notre revue de littérature, nous avons émis trois hypothèses :

- H1 : L'humain virtuel expressif permet une reconnaissance de ses émotions de base comparable à celle de l'humain réel.
- H2 : L'absence de variation de la taille des pupilles en fonction de l'état émotionnel impacte la reconnaissance des émotions sur un humain virtuel expressif.
- H3 : L'absence des rides d'expression impacte la reconnaissance des émotions sur un humain virtuel expressif.

3.4 Résultats

3.4.1 Reconnaissance des émotions et confusions

En amont d'une analyse comparative, nous allons en premier lieu présenter les résultats généraux des participants sur la reconnaissance des émotions. Outre la peur, il est important de noter qu'il y a un haut niveau de reconnaissance des émotions que ce soit pour l'humain réel ou les humains virtuels (Figure 3.6). Le taux de reconnaissance moyen des émotions de base sur l'humain virtuel est de 82,52% (Annexe B.3). À titre de comparaison, le taux de reconnaissance moyen des émotions de l'humain réel est quelque peu plus élevé 85,77%. Nous observons que l'émotion de peur apparaît plus difficile à reconnaître, quelle que soit la condition.

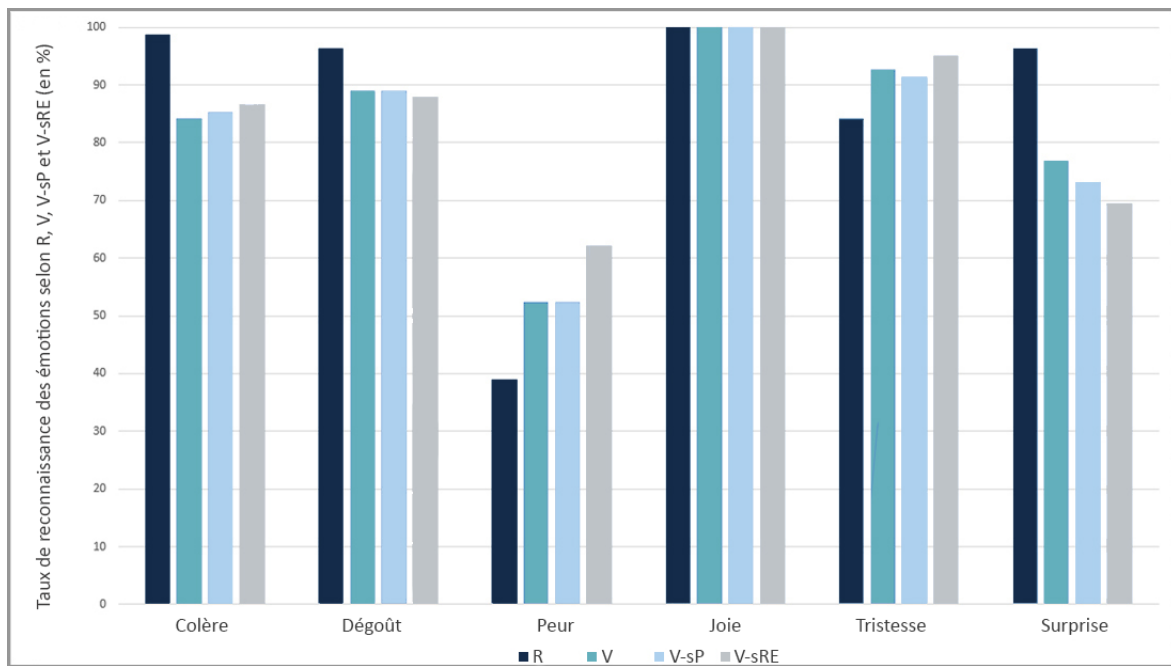


FIGURE 3.6 – Taux de reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels (en %).

Lors de cette étude, les participants indiquaient le niveau de certitude lié à leur réponse grâce à une échelle de Likert en 5 points. Nous constatons globalement un haut niveau de certitude des participants lors de la reconnaissance des émotions (Figure 3.7).

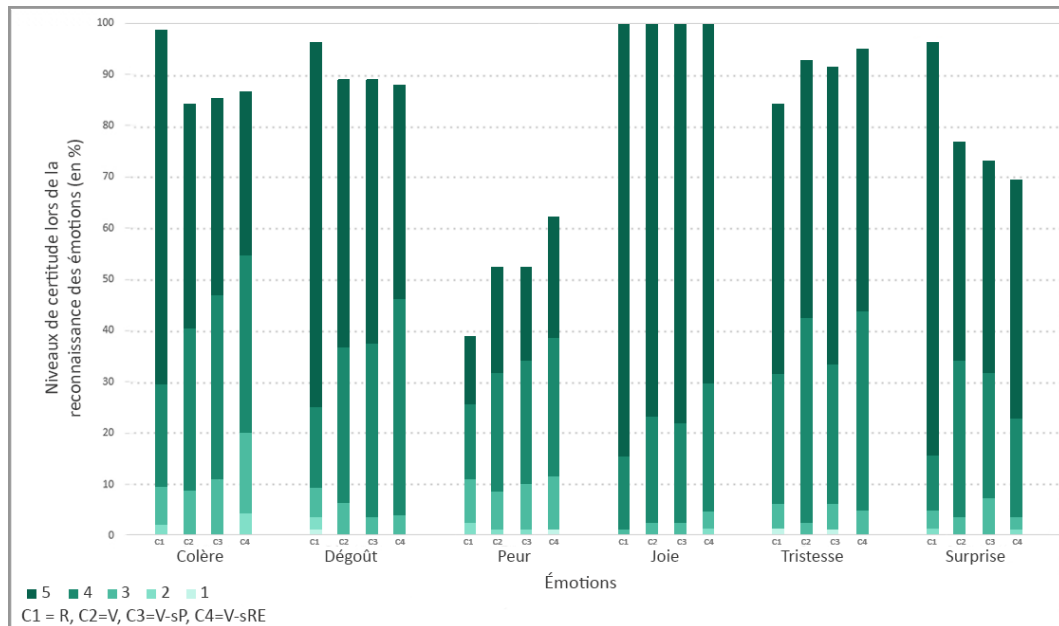
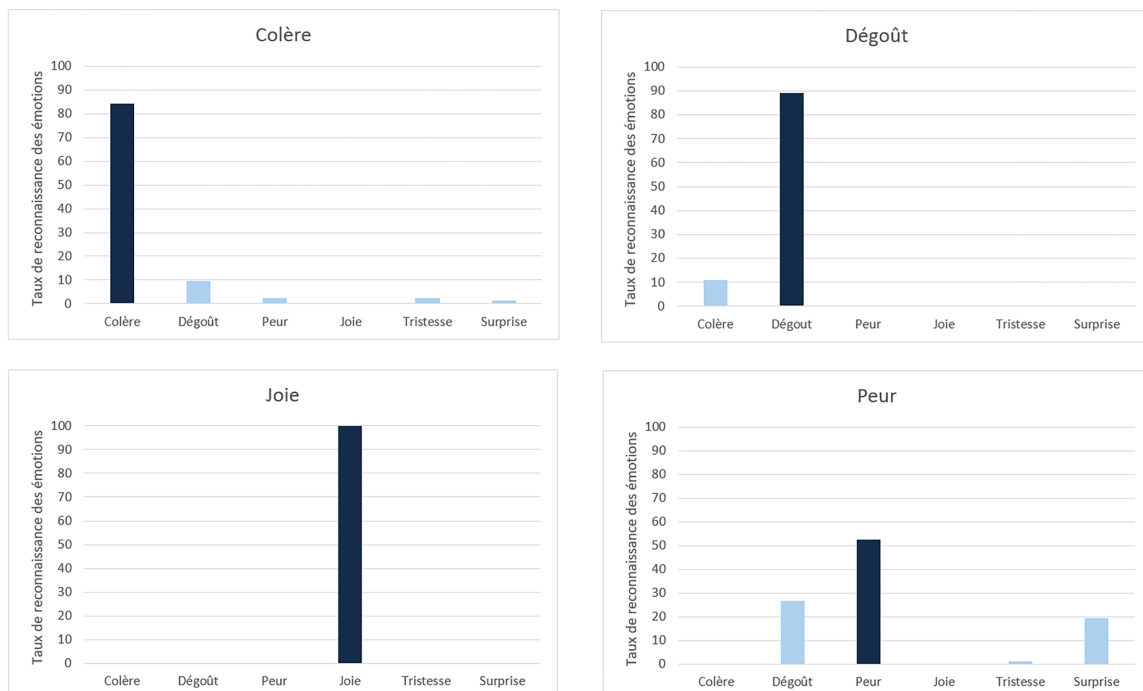


FIGURE 3.7 – Résumé des réponses des participants et de leur niveau de certitude (en %) pour la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels.

Afin de mieux comprendre les réponses des participants concernant l'humain virtuel (V), nous avons analysé les erreurs et les confusions existantes lors de la reconnaissance des émotions de base (Figure 3.8). Il existe des confusions mineures entre les émotions de colère et de dégoût, ainsi que des confusions plus importantes lors de la reconnaissance de la peur, qui est confondue avec le dégoût et la surprise. Il apparaît également des confusions lors de la reconnaissance de la surprise avec l'émotion de peur.



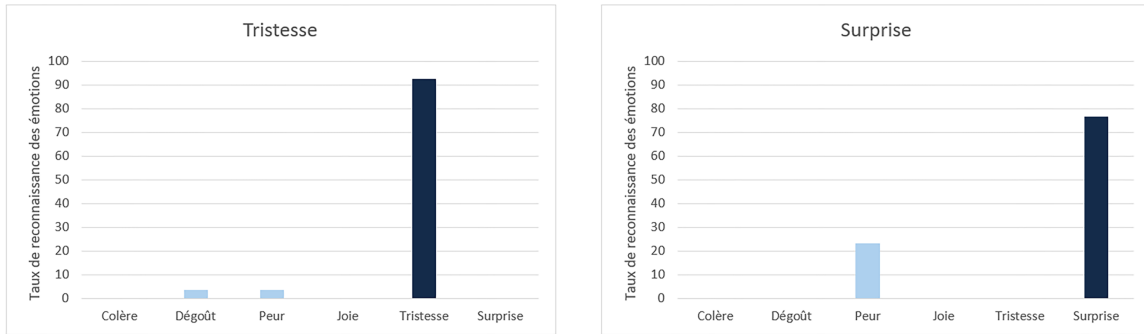


FIGURE 3.8 – Reconnaissances et confusions pour les émotions (en %)

3.4.2 Analyse de la reconnaissance des émotions

Dans l'objectif de déterminer si la reconnaissance des émotions était aussi effective dans nos différentes conditions, nous avons effectué une analyse inférentielle. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été effectué afin de vérifier la normalité de la distribution des données. Les variables ne suivant pas une distribution normale ($p < 0,05$ pour les variables testées), nous avons utilisé des tests non-paramétriques afin de comparer la reconnaissance de chaque émotion de base. Suite au test de Friedman, nous avons effectué les tests *post-hoc* de Wilcoxon. Les résultats sont considérés comme significatifs quand $p < 0,05$. La correction de Bonferroni a été appliquée pour ajuster la valeur alpha pour les comparaisons *post-hoc* par paires que nous avons considérées, résultant en un seuil de significativité fixé à $p < 0,0167$.

Le test de Friedman a donc été utilisé afin d'analyser la reconnaissance des émotions en comparant nos quatre conditions (R, V, V-sP, V-sRE). Les résultats de ce test ont indiqué une différence significative entre les quatre conditions (R, V, V-sP, V-sRE) pour l'émotion de colère ($\chi^2(3, N=82) = 13,741$; $p = 0,003$), pour l'émotion de peur ($\chi^2(3, N=82) = 11,020$; $p = 0,012$), pour l'émotion de tristesse ($\chi^2(3, N=82) = 8,438$; $p = 0,038$), ainsi que pour l'émotion de surprise ($\chi^2(3, N=82) = 26,450$; $p < 0,001$). Ces résultats démontrent que la reconnaissance des émotions n'est pas aussi effective en fonction des conditions. Toutefois, il n'y a pas de différence significative pour les émotions de dégoût et de joie.

Pour chacune de ces émotions, nous avons effectué le test de Wilcoxon pour les paires R et V, V et V-sP et enfin V et V-sRE. Il n'y a pas de différence significative lors des tests comparant les conditions : V et V-sP, ainsi que V et V-sRE, c'est-à-dire entre les différents humains virtuels.

Concernant la comparaison des conditions R et V, il existe des différences significatives pour la colère et la surprise, qui sont moins bien reconnues sur l'humain virtuel que sur l'humain réel (Tableau 3.1). De plus, nous observons une tendance pour la peur, moins bien reconnue sur l'humain réel que sur l'humain virtuel ($Z = 2,043$; $p = 0,041$). Les résultats concernant la peur ne peuvent être considérés comme statistiquement significatifs en raison de l'ajustement de Bonferroni.

TABLEAU 3.1 – Résultats du test de Wilcoxon concernant la comparaison de la reconnaissance avec les conditions R et V

Émotion	Mean		p	Z
	R	V		
Colère	.99	.84	0,001	3,207
Peur	.39	.52	0,041	2,043
Tristesse	.84	.93	0,071	1,807
Surprise	.96	.77	<0,001	3,578

Analyse détaillée : niveaux de certitude et temps de réponse

Suite à ces premiers tests, nous avons analysé le temps de réponse et le niveau de certitude des participants ayant réussi à reconnaître les émotions dans les conditions R et V. Ce choix est effectué, car si la reconnaissance n'est pas correcte, les niveaux de certitude et le temps de réponse peuvent être potentiellement biaisés.

Le test de Kolmogorov-Smirnov a été effectué pour vérifier la normalité de la distribution des données concernant ces deux variables, temps de réponse et niveau de certitude. Les variables ne suivant pas une distribution normale, nous avons appliqué des tests non-paramétriques. Le test Wilcoxon a été utilisé pour comparer le niveau de certitude et le temps de réponse pour chaque émotion de base entre les conditions R et V.

Concernant la peur ($N=23$), les participants sont plus sûrs d'eux lors de la reconnaissance sur l'humain virtuel que sur l'humain réel (Tableau 3.2). Pour la surprise ($N=61$), les participants sont plus confiants et mettent moins de temps à répondre pour identifier la surprise sur R. Enfin pour la colère ($N=68$), une tendance est également observée, les participants sont plus sûrs d'eux dans la reconnaissance de la colère sur R que sur V.

Pour résumer, il est important de noter que le taux de reconnaissance des émotions est très élevé (moyenne supérieure à 80%) pour l'humain réel comme l'humain virtuel. Toutefois, il existe des différences significatives concernant la reconnaissance des émotions de colère et surprise, en faveur de l'humain réel. Nous observons également une tendance concernant la

reconnaissance de la peur en faveur de l'humain virtuel. Enfin, le temps de réponse et le niveau de certitude sont également impactés pour les émotions de colère, peur et surprise.

TABLEAU 3.2 – Résumé statistique du niveau de certitude et du temps de réponse pour la reconnaissance sur l'humain réel R et l'humain virtuel V

Émotion	Niveau de certitude				
	R		V		p
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
Colère	4,63	0,667	4,43	0,676	<i>0,072</i>
Dégoût	4,61	0,804	4,53	0,607	
Peur	3,87	0,92	4,26	0,689	0,021
Joie	4,83	0,41	4,74	0,492	
Tristesse	4,52	0,752	4,54	0,561	
Surprise	4,85	0,441	4,51	0,595	<0,001

Émotion	Temps de réponse				
	R		V		p
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
Colère	10,17	6,58	10,81	5,39	
Dégoût	8,07	3,275	8,96	5,571	
Peur	12,21	4,982	10,4	5,997	
Joie	8,8	5,332	8,85	6,397	
Tristesse	11,7	5,817	11,3	7,094	
Surprise	8,26	8,967	9,2	5,494	0,049

Le seuil de significativité est reporté en gras quand $p < 0,05$. Les tendances sont inscrites en italique ($0,05 < p < 0,1$).

3.4.3 Impact de l'absence de la variation de la taille des pupilles

Comme évoqué précédemment, nous n'avons pas observé de différence significative suite au test de Wilcoxon concernant la reconnaissance des émotions selon les conditions V et V-sP. Dans l'objectif de comparer les niveaux de certitude et le temps de réponse des participants ayant réussi à reconnaître les émotions dans les deux conditions V et V-sP, nous avons tout d'abord effectué le test de Kolmogorov-Smirnov afin de vérifier la normalité de la distribution des données concernant ces deux conditions. Les données ne suivent pas une distribution normale, nous avons donc utilisé des tests non-paramétriques. Nous avons appliqué le test de Wilcoxon, toutefois, nous n'avons pas observé de différence significative concernant le niveau de certitude et le temps de réponse des participants entre la condition humain virtuel V et la condition humain virtuel sans variation des pupilles V-sP.

3.4.4 Impact de l'absence des rides d'expression

Afin de comparer les réponses des participants ayant réussi à reconnaître les émotions dans les deux conditions V et V-sRE et tel que dans les analyses précédentes, nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov afin de vérifier la normalité de distribution des données. Les variables ne suivant pas une distribution normale, nous avons donc appliqué le test de Wilcoxon pour comparer le niveau de certitude et de temps de réponse pour chaque émotion de base entre la condition humain virtuel V et la condition humain virtuel sans rides d'expressions V-sRE (Tableau 3.3).

TABLEAU 3.3 – Résumé statistique du niveau de certitude et du temps de réponse pour la reconnaissance sur l'humain virtuel V et l'humain virtuel sans rides V-sRE

Émotion	Niveau de certitude				
	V		V-sRE		p
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
Colère	4,42	0,666	4,1	0,804	0,005
Dégoût	4,58	0,555	4,45	0,585	
Peur	4,29	0,783	4,23	0,92	
Joie	4,74	0,492	4,65	0,616	
Tristesse	4,51	0,555	4,53	0,579	
Surprise	4,58	0,538	4,64	0,663	

Émotion	Temps de réponse				
	V		V-sRE		p
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
Colère	10,89	5,554	13,84	9,381	0,03
Dégoût	8,91	5,009	9,94	5,003	<i>0,072</i>
Peur	9,86	6,068	10,75	6,033	
Joie	8,85	6,397	9,58	5,443	
Tristesse	11,3	6,81	10,96	5,969	
Surprise	8,26	5,112	8,1	5,357	

Le seuil de significativité est reporté en gras quand $p < 0,05$. Les tendances sont inscrites en italique ($0,05 < p < 0,1$).

Concernant l'impact des rides d'expression pour l'émotion de colère (N=62), les participants sont plus sûrs d'eux et mettent moins de temps à répondre pour la reconnaissance de cette émotion sur l'humain virtuel que sur l'humain virtuel sans rides d'expression (Tableau 3.3). Pour le dégoût (N=67), il y a une tendance concernant le temps de réponse pour la reconnaissance de cette émotion entre l'humain virtuel et l'humain virtuel sans rides d'expression. Les participants mettent moins de temps à répondre lorsqu'ils sont confrontés à

l'humain virtuel V, c'est-à-dire possédant des rides d'expression.

En conclusion et d'après les résultats ci-dessus, la reconnaissance des émotions est sensiblement la même avec ou sans ces facteurs visuels. En effet, la variation du diamètre pupillaire ne semble pas jouer un rôle prépondérant dans la reconnaissance des émotions. Néanmoins, les rides impactent le niveau de certitude et contribuent à la rapidité de la reconnaissance de certaines émotions, notamment la colère et le dégoût, toutefois, cet impact s'avère limité. Nous préconisons des études complémentaires sur la présence des rides d'expression, notamment concernant leur intensité.

3.4.5 Acceptabilité, expressivité et exagération

Nous avons obtenu les réponses au questionnaire post-expérimentation concernant l'expressivité (EXP), l'acceptabilité (A) ainsi que l'exagération des expressions faciales émotionnelles (EXA) des humains virtuels et réels, en utilisant des échelles de Likert à 5 points (Annexe B.4). Le test de Kolmogorov-Smirnov a révélé que les variables ne suivent pas une distribution normale. Nous avons choisi les tests non-paramétriques de Wilcoxon pour analyser ces données.

Concernant l'acceptabilité, bien que cela ne soit pas une différence significative, nous notons tout de même une tendance pour une meilleure acceptabilité des humains virtuels par rapport à l'humain réel ($Z = 1,807$; $p = 0,071$) (Figure 3.9).

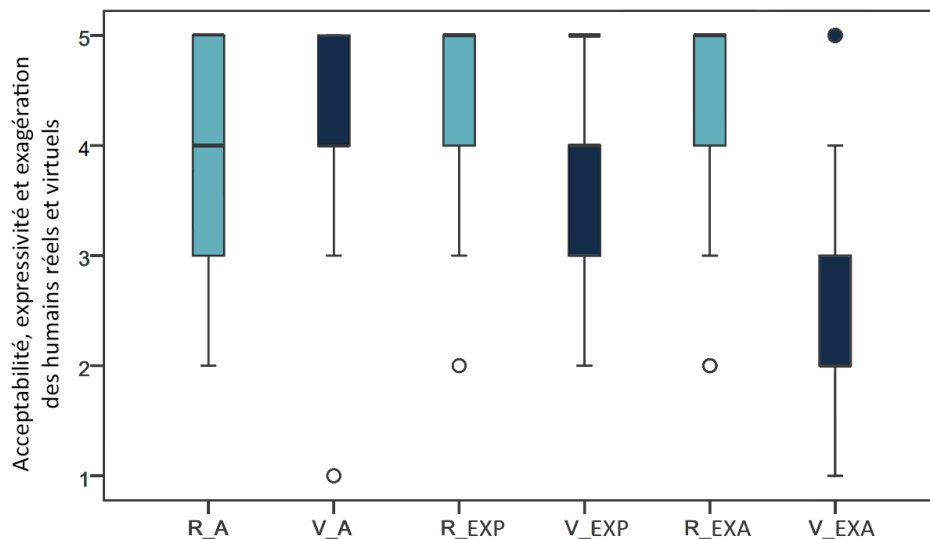


FIGURE 3.9 – Résumé des réponses des participants sur l'acceptabilité A, l'expressivité EXP et l'exagération EXA de l'humain réel (R) et des humains virtuels (V).

Le risque lié au phénomène de l'Uncanny Valley [Mori *et al.*, 1970] semble avoir été écarté, car les participants ont indiqué être à l'aise face aux humains virtuels ($M = 4,19$; $SD = 0,851$). Cependant, il y a des différences significatives concernant l'expressivité. Les participants ont trouvé l'humain réel plus expressif ($Z=4,867$; $p < 0,001$). Toutefois, ils ont également indiqué que ses émotions étaient exagérées ($Z=6,456$; $p < 0,001$) (Figure 3.9).

Au sein du questionnaire post-expérimentation, une question portait sur les difficultés ressenties par les participants à reconnaître les émotions sur les humains réels et virtuels (Figure 3.10). Les participants pouvaient choisir plusieurs émotions ou aucune pour cette question. Pour l'humain réel, en majorité, ils ont indiqué ne pas avoir eu de difficultés de reconnaissance (63,2%).

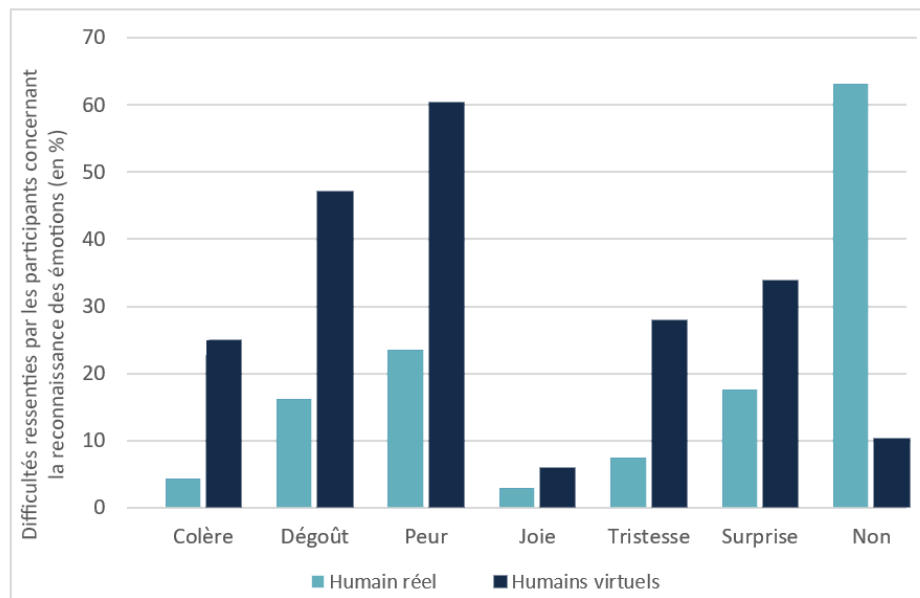


FIGURE 3.10 – Avis des participants sur les difficultés potentiellement rencontrées lors de la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels, en %

En proportion, on observe que les émotions qui semblent les plus difficiles à reconnaître sur l'humain réel sont la peur (23,5%) puis la surprise (17,6%) et le dégoût (16,2%).

Pour les émotions des humains virtuels, seuls 10,3% des participants ont indiqué ne pas avoir eu de difficultés. Toutefois, leurs principales difficultés se sont portées sur les mêmes émotions que sur l'humain réel, c'est-à-dire la peur, le dégoût et la surprise (Figure 3.10).

Enfin, notre questionnaire contenait une question sur le dérangement que la représentation de certaines émotions aurait pu causer chez le participant. Les participants pouvaient indiquer ne pas avoir été gênés ou indiquer les émotions dérangeantes à cette question. Les

participants semblent être légèrement moins dérangés face aux émotions des humains virtuels (63,2%) que face à celles de l'humain réel (58,2%) (Figure 3.11).

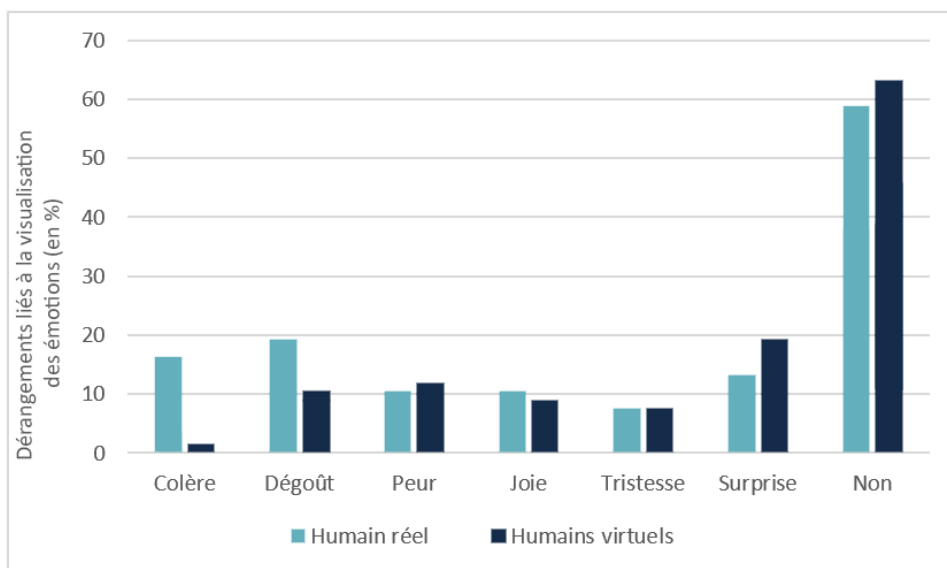


FIGURE 3.11 – Résumé des réponses à la question concernant les émotions dont la représentation était dérangeante pour les participants, en %

3.5 Discussion

3.5.1 Reconnaissance des émotions de base sur un humain virtuel

Un des objectifs de cette étude était de déterminer si l'expression des émotions de base sur un humain virtuel expressif, générée à partir d'un processus de retranscription des émotions basé sur le FACS et des techniques avancées de photogrammétrie, permettait une reconnaissance des émotions aussi effective que sur un humain réel. En accord avec les recherches antérieures [Dyck *et al.*, 2008], il apparaît que les expressions faciales émotionnelles sont bien reconnues. Notre étude démontre un taux de reconnaissance élevé pour la plupart des émotions de base.

Malgré ce fort taux de reconnaissance, notre analyse démontre qu'il existe des confusions qui se portent majoritairement sur les émotions négatives. Il y a des confusions entre le dégoût et la colère, ainsi qu'entre la peur et la surprise. Il semble que ces confusions soient courantes [Kätsyri et Sams, 2008], l'étude de Courgeon *et al.* [2009] sur la reconnaissance des émotions révélait également ces confusions. Les justifications liées à ces confusions semblent être que les émotions négatives de faible intensité tendent à être confondues surtout lorsqu'elles ont des Unités d'actions (AU) en commun [Jackson *et al.*, 2015].

3.5.2 Reconnaissance des émotions sur les humains virtuels et l'humain réel

Nous avons comparé la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles sur l'humain réel (R) et sur l'humain virtuel (V) afin de comparer la capacité de l'agent virtuel à retranscrire des émotions de façon analogue à un humain réel. Notre hypothèse H1 est partiellement validée. En effet, nos analyses nous apprennent qu'il existe des différences significatives concernant la reconnaissance de la colère et de la surprise, qui sont mieux reconnues sur l'humain réel. De plus, le niveau de certitude des participants est significativement plus élevé pour l'humain réel pour l'émotion de surprise, ainsi qu'une tendance similaire pour la colère. Nous observons également une différence significative concernant le niveau de certitude en faveur de l'humain virtuel pour l'émotion de peur. Suite à l'analyse des réponses au questionnaire post-expérimentation, il est intéressant de noter que les participants trouvent l'humain virtuel moins expressif que l'humain réel (Figure 3.9), ce qui peut expliquer les difficultés à reconnaître certaines émotions. Certains participants ont d'ailleurs déclaré :

« [L'humain réel est] très expressif presque caricatural ce qui aide beaucoup »

« [Les émotions de l'humain virtuel sont] plus naturelles mais plus difficiles à lire »

« [L'humain virtuel a] des expressions moins marquées, un peu moins d'expressivité »

Travailler sur l'intensité des émotions semble être une piste à explorer pour les distinguer plus aisément. En effet, en plus de l'ajout d'autres facteurs d'expressivité, Courgeon *et al.* [2009] recommande une intensité plus élevée notamment pour faciliter la reconnaissance de la peur sur les agents virtuels. La peur est d'ailleurs l'émotion la moins bien reconnue que ce soit sur l'humain virtuel ou sur l'humain réel. Dans la lignée des résultats de Dyck *et al.* [2008] qui révélaient des confusions lors de la reconnaissance de l'expression de la peur avec d'autres émotions négatives, nous avons observé que cette expression faciale émotionnelle est fortement confondue avec le dégoût et la surprise. Certains participants ont d'ailleurs fait part de leur difficulté de percevoir l'émotion de la peur, que ce soit sur les humains virtuels comme sur l'humain réel (Figure 3.10). En plus de partager les mêmes AUs, ce qui favorise les confusions, nous supposons que le manque de contexte ne favorise pas la reconnaissance et la différenciation des émotions négatives. Notre étude ne permet de percevoir que le visage de l'agent, alors que la peur par exemple s'inscrit dans un contexte et provoque des réactions corporelles importantes (ex : mouvement de recul, changement de respiration), ce qui faciliterait sa reconnaissance [Ekman, 2007]. En revanche et bien que ces résultats ne peuvent être considérés comme statistiquement significatifs, il est intéressant de constater qu'il existe une tendance pour la reconnaissance de la peur en faveur de l'humain virtuel. Il existe également une différence significative concernant le niveau de certitude de la peur en faveur de l'humain virtuel ($p=0,021$). Nous supposons que ces différences sont liées au fait que les émotions de l'humain réel ne sont pas spontanées (seule l'émotion de joie était une émotion spontanée). Nous avons analysé les réponses des participants au questionnaire post-expérimentation afin de recueillir des informations pouvant mettre en avant différents phénomènes susceptibles d'expliquer ce résultat. Sur la question de l'exagération des émotions exprimées, nous obtenons ainsi une différence significative. Les participants ont indiqué que l'humain réel surjouait les émotions, ce qui provoque un dérangement et peut porter préjudice à la reconnaissance de ces émotions non-spontanées (Figure 3.9). Les participants ont également déclaré :

« Ça [l'humain réel] m'a paru trop exagéré par rapport au modèle 3D »

« L'humain virtuel se rapprochait plus de la réelle expressivité d'un humain »

« La femme était très expressive mais pas très réaliste, on voyait qu'elle jouait la comédie »

« Elle [l'agent virtuel] était plus modérée que la personne réelle, donc selon moi plus plausible »

« L'humain virtuel est très représentatif et je me sens presque plus à l'aise qu'avec le réel »

3.5.3 Impact de l'absence des rides d'expression et de la variation pupillaire sur la reconnaissance

Contrairement à nos attentes, les résultats de notre expérience concernant l'impact de l'absence de variation pupillaire liée à l'état émotionnel ne permettent pas d'identifier un réel désavantage pour la reconnaissance des émotions de base. L'humain virtuel possède déjà un niveau d'expressivité relativement élevé grâce à son processus de conception basé sur le FACS de Ekman et Friesen [1978]. La variation des pupilles semble être un facteur visuel trop subtil pour que son absence ait un impact sur la reconnaissance des émotions sur l'agent virtuel. Lors d'interactions entre humains réels, nous prenons implicitement en compte cette variation des pupilles, c'est un indice important qui apporte des informations sociales, notamment en reflétant l'état cognitif et affectif d'autrui [Kret et De Dreu, 2019]. Malgré leur importance dans les interactions humaines et suite aux résultats observés concernant leur impact sur la reconnaissance des émotions sur l'agent, nous ne sommes pas en mesure de préconiser leur adaptation en fonction de l'état émotionnel de l'agent virtuel. Notre hypothèse H2 ne peut être validée. De nouvelles recherches, notamment sur l'intensité, seraient bénéfiques pour obtenir plus de détails sur l'effet de la variation pupillaire en fonction de l'état émotionnel.

En accord avec les recherches antérieures de Courgeon [2011], nous n'observons pas de différence significative lors de la reconnaissance des émotions entre l'humain virtuel et l'humain virtuel sans rides d'expression. Le taux de reconnaissance des émotions sur l'humain virtuel possédant des rides d'expression est quelque peu plus élevé en comparaison à l'étude de Courgeon [2011], laissant supposer que les améliorations récentes des processus de conception, tels que la photogrammétrie, tendent à favoriser la reconnaissance des émotions.

Comme pour la variation du diamètre pupillaire, nous supposons que les rides d'expression interviennent seulement comme des indices supplémentaires que nous prenons en compte implicitement et qui n'empêchent pas la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles. Ces résultats ne nous permettent pas de valider notre hypothèse H3. Toutefois, en analysant les réponses des participants et notamment leur temps de réponse et leur niveau de certitude, il existe des différences significatives en faveur de l'humain virtuel (V) par rapport à l'humain virtuel dépourvu de rides d'expression (V-sRE). Ces différences portent sur l'expression de la colère, nous observons également une tendance concernant le temps de réponse pour l'expression du dégoût. Bien que l'expression faciale du dégoût soit bien reconnue, les participants mettent plus de temps à répondre lorsque l'agent virtuel n'a pas de rides d'expression. Des expérimentations impliquant un panel plus conséquent pourraient probablement confirmer cette tendance statistique. Comme pour la variation des pupilles, des études sur l'intensité

seraient intéressantes. Nous pouvons supposer que si une forte intensité des facteurs visuels d'expressivité a un impact bénéfique sur la reconnaissance des émotions, cela pourrait notamment être profitable lors de formations dédiées aux professionnels de santé. Par exemple, une forte intensité pourrait aider les apprenants à reconnaître les émotions en début de formation, puis il serait possible de baisser cette intensité au fur et à mesure de la formation pour aboutir à une intensité réaliste et ainsi les préparer à la rencontre avec un patient.

3.5.4 Limites de l'étude

Le FACS ainsi que le processus utilisé pour la conception de l'agent virtuel permettent un haut niveau de réalisme émotionnel. Les résultats de la reconnaissance des émotions sont très élevés. Les facteurs visuels, dont le regard, les mouvements de la tête, les variations de pigmentation de la peau, contribuent à l'expressivité d'après notre revue de littérature. Nous supposons que les rides d'expression et les variations pupillaires faciliteraient également la reconnaissance des émotions, néanmoins, il semble qu'elles ont moins d'effet que l'activation des muscles faciaux (AUs). Il est difficile d'évaluer avec précision leur implication dans l'expressivité d'un humain virtuel. La gestion de l'intensité pour la variation pupillaire et pour les rides dynamiques pourrait être une bonne alternative pour évaluer leur impact sur la reconnaissance des émotions lors d'une future étude.

De plus, nous avons porté une attention à la similitude entre la femme réelle et la femme virtuelle : femme caucasienne, cheveux clairs, yeux bleus, peau pâle. Cependant, il subsiste des différences notamment concernant l'âge. Il serait favorable d'obtenir un scan 3D et des extraits vidéos provenant du même individu afin de comparer les résultats. Nous travaillons pour cela sur des recherches complémentaires concernant l'adaptation de notre processus de conception afin d'obtenir un processus plus simple en utilisant des photos plutôt que des scans 3D. Cette technique permettrait d'obtenir facilement un humain virtuel ressemblant à l'humain réel. Cependant, cela ne garantit pas un rendu d'aussi bonne qualité qu'en se basant sur un scan obtenu grâce à la photogrammétrie. De plus, cela ne concerne que le réalisme visuel et non l'expressivité. Outrepasant les difficultés techniques, il serait profitable d'effectuer une étude complémentaire comprenant des humains réels et virtuels de différents âges et genres.

3.5.5 Introduction à la seconde expérimentation

La reconnaissance des émotions de l'agent virtuel expressif était une condition nécessaire à la poursuite de nos travaux. Nous allons à présent investiguer l'impact d'un agent virtuel expressif sur l'empathie de l'utilisateur. Ces travaux seront présentés dans le chapitre 4.

Chapitre 4

Expérimentation 2 : Impact des agents virtuels expressifs sur l'empathie de l'utilisateur

Sommaire

4.1	Résumé	110
4.2	Présentation de l'expérimentation	111
4.3	Matériel et méthodes	112
4.3.1	Application	112
4.3.2	Participants	114
4.3.3	Procédure	115
4.3.4	Mesures	118
4.3.5	Hypothèses	121
4.4	Résultats	122
4.4.1	Humeur et habitudes	122
4.4.2	Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'empathie	124
4.4.3	Sentiment de similarité et lien affectif	127
4.4.4	Sentiment de présence sociale et engagement	128
4.5	Discussion	132
4.5.1	Empathie	132
4.5.2	Agent virtuel expressif, sentiment de similarité et lien affectif	134
4.5.3	Agent virtuel expressif, présence sociale et engagement	135
4.5.4	Retour d'expérience sur les simulateurs en soins infirmiers	136
4.5.5	Limites de l'étude	136

4.1 Résumé

Les simulateurs en santé sont des environnements d'apprentissage offrant de nombreuses possibilités de formation. Comme indiqué dans notre revue de littérature, les étudiants en médecine ont fait savoir leur souhait de s'entraîner avec des simulateurs et des agents virtuels, afin de pouvoir s'exercer et se préparer au mieux avant leur rencontre avec des patients standardisés et de vrais patients [Johnsen *et al.*, 2005]. L'intégration de patients virtuels dotés d'émotions favorise les échanges et les interactions, et provoque des réactions émotionnelles chez l'apprenant. Cela favorise l'implication émotionnelle qui facilite la mémorisation. À partir de ces éléments, nous avons porté nos recherches sur les humains virtuels expressifs et leur impact sur les réactions empathiques de l'utilisateur. Ce chapitre présente notre deuxième étude. Nous investiguons l'impact des humains virtuels réalistes et expressifs sur l'empathie de l'utilisateur. Nous observons une différence significative concernant l'impact de l'expressivité faciale des humains virtuels sur la prise de perspective de l'utilisateur, vecteur de la composante cognitive de l'empathie. Nos résultats mettent également en avant l'importance du contexte de la simulation et des caractéristiques des utilisateurs, telles que leur âge. Dans le but de contribuer à l'amélioration des interactions humain-machine, nous investiguons également l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur la présence sociale et l'engagement. Nous n'observons pas de différences significatives, néanmoins les scores relatifs à la présence sociale et à l'engagement sont élevés lors de cette simulation. Nos résultats renforcent l'idée d'une potentielle corrélation entre les dimensions de l'empathie, de la présence sociale et de l'engagement, telle qu'évoquée dans notre revue de littérature.



FIGURE 4.1 – Illustration de l'humain virtuel expressif

4.2 Présentation de l'expérimentation

Les conclusions de notre revue de littérature ont permis de mettre en exergue les nombreux facteurs à prendre en considération afin de favoriser la mise en place d'une situation propice à l'empathie [Paiva *et al.*, 2017]. Parmi ces derniers, nous nous focalisons sur les caractéristiques de l'agent virtuel et particulièrement son expressivité faciale [Besel et Yuille, 2010; Dimberg *et al.*, 2011]. Ce second axe de recherche a donc pour objectif d'investiguer l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'induction d'empathie chez l'utilisateur. Les sujets de l'expérimentation interagissent avec des patientes virtuelles au sein d'un simulateur en santé. Nous souhaitons ici analyser les bénéfices potentiels liés à l'expressivité d'un agent en termes d'induction d'empathie affective et cognitive.

Une attention particulière est accordée aux autres facteurs que l'expressivité afin que l'induction d'empathie soit rendue possible et que l'expérience soit crédible. Concernant le facteur lié à la situation et au contexte, un travail minutieux fut effectué sur le scénario et la narration, notamment pour les dialogues. Cette étude repose sur un projet de formation en santé, c'est pourquoi l'environnement 3D représente un environnement hospitalier. Il est créé dans un style réaliste pour être en adéquation avec l'apparence de l'agent. L'induction d'empathie dépend également des caractéristiques des utilisateurs, c'est pourquoi le profil des participants est ciblé, ce sont des étudiants en soins infirmiers. L'induction d'empathie étant rendue possible seulement face à un utilisateur non-réfractaire à l'expérience, nous prenons également en compte l'humeur du participant à effectuer cette simulation [Watson *et al.*, 1988]. Nous souhaitons analyser si les patients virtuels expressifs activent les mécanismes d'empathie de l'utilisateur. Nous mesurons l'activation de ces mécanismes à l'aide d'un questionnaire sur l'empathie cognitive et affective [Reniers *et al.*, 2011] que nous complétons avec la captation de réactions faciales de l'utilisateur [Neumann et Westbury, 2011].

Notre revue de littérature a mis en exergue qu'un agent virtuel a un effet positif sur l'engagement de l'utilisateur [Gamage et Ennis, 2018]. La crédibilité de l'agent virtuel et l'attachement de l'utilisateur envers l'agent favorisent également un engagement et un sentiment de présence plus forts [Hall *et al.*, 2006; Von Der Pütten *et al.*, 2009]. De fait, nous investiguons l'impact de l'expressivité faciale de l'agent sur la présence sociale, dont les dimensions de co-présence et d'interdépendance émotionnelle perçue, et sur l'engagement de l'utilisateur, dont les notions d'esthétique et de satisfaction.

La section suivante détaille le protocole expérimental de notre étude. La partie 4.4 restitue l'analyse des données collectées. Enfin, les résultats sont discutés dans la partie 4.5, préalablement à l'évocation des limites de notre étude.

4.3 Matériel et méthodes

4.3.1 Application

Présentation du simulateur dédié aux soins infirmiers

En collaboration avec les formateurs des 27 Instituts de Formation en Soins Infirmiers (IFSI) de Nouvelle-Aquitaine, la société Simforhealth a conçu des simulateurs pour la formation en soins infirmiers. Ces simulateurs ont été réalisés en adéquation avec le programme en soins infirmiers constitué de dix compétences principales à acquérir pour l'obtention du diplôme. Notre étude prend place dans le cadre du simulateur lié à la compétence concernant « l'accompagnement d'une personne dans la réalisation de ses soins quotidiens ». Au sein de ce simulateur, les étudiants doivent prendre en charge une patiente, l'accompagner pour sa toilette et réagir de façon appropriée face aux douleurs ressenties par cette dernière. Les formateurs infirmiers ayant créé le scénario de ce simulateur ont fourni un descriptif précis de l'environnement et de la patiente, d'où les choix graphiques effectués. Les dialogues, les interactions ainsi que le comportement de l'agent proviennent de réflexion avec des professionnels de santé afin de garantir la crédibilité de la patiente. Les comportements ont été détaillés lors de la rédaction du scénario et les animations ont été validées lors de la conception du simulateur. Dans le cadre de cette étude et également en partenariat avec les formateurs, un travail fut effectué afin de créer une situation émotionnelle. Le simulateur a été adapté pour induire des émotions et susciter l'empathie des utilisateurs. Les facteurs d'empathie en environnements virtuels ont été pris en compte, que ce soit relativement aux caractéristiques de la patiente, à la situation ou encore aux interactions mises en place.

L'environnement virtuel

L'ensemble de la simulation se déroule dans la chambre de la patiente. Cette chambre fait partie d'un Établissement d'Hébergement pour Personnes Agées Dépendantes (EHPAD) (Figure 4.2). Une attention particulière a été portée à cet environnement et aux éléments de décor le composant. La distance séparant le soignant de la patiente virtuelle a également été prise en compte afin de permettre des échanges réalistes. Cela participe aux notions de contexte et de situation dans laquelle est immergé l'utilisateur.



FIGURE 4.2 – Rendus de l'environnement virtuel et de la patiente intégrée dans l'environnement

L'agent virtuel expressif

L'agent virtuel réaliste et expressif intégré dans le simulateur est basé sur l'agent présenté dans notre première expérimentation. Ce personnage a été modifié afin d'être doté d'un corps et de vêtements adaptés à la description de la patiente de cette simulation. Cet agent bénéficie également de synchronisation labiale et d'expressions corporelles adaptées aux dialogues (hochement de tête, respiration, mouvements de mains). Le processus de conception et les améliorations apportées pour cette expérimentation sont détaillés en annexe (Annexes A).



FIGURE 4.3 – Rendu de l'humain virtuel expressif

Équipement et conditions d'expérimentation

Nous avons effectué l'étude au sein des Instituts de Formation en Soins Infirmiers. Afin de garantir des conditions de passation similaires, il était demandé aux établissements de disposer d'une salle dédiée à l'expérimentation et nous fournissons le matériel intégralement. Trois participants effectuaient l'expérimentation simultanément. Afin de respecter une zone de confidentialité, chaque participant avait un espace réservé et éloigné des autres participants et

de l'expérimentateur, de manière à ce que le contenu affiché à l'écran soit visible exclusivement par le participant. L'application est exécutée sur des ordinateurs portables équipés d'un processeur Intel Core i7-6700HQ et de carte graphique Nvidia GeForce GTX 1060 ou GTX 1070, cette différence n'ayant pas d'impact sur le rendu et l'application. Ces ordinateurs disposent d'une webcam, qui est utilisée afin de capter les réactions faciales du participant, potentiel signe d'empathie affective, à l'aide du plugin Affdex de Affectiva développé pour le moteur de rendu Unity 3D. L'application est exécutée avec une définition de 1920*1080, cette haute définition permet une bonne visualisation de l'agent et de ses réactions.

Choix du dispositif de captation d'expressions faciales

Nous avons effectué une veille technologique afin de prendre connaissance des solutions les plus adaptées pour la captation des expressions faciales émotionnelles de l'utilisateur (tableau comparatif en Annexe C.1). Nous avons retenu la solution Affdex d'Affectiva¹. Cette solution est adaptée pour une intégration au sein de notre expérimentation. Elle utilise 34 points de tracking afin de capter une vingtaine d'expressions faciales et est en capacité de détecter sept émotions (la colère, le dégoût, la peur, la joie, la tristesse, la surprise et le mépris) (Annexe C.2). D'après l'entreprise Affectiva, la perception des émotions par le dispositif atteint un seuil de précision important, supérieur à 90%. Affectiva utilise la courbe « *Receiver Operating Characteristic* » (ROC) afin d'évaluer sa solution. Les valeurs du score ROC sont comprises entre 0 et 1. Plus la valeur est proche de 1, plus le classificateur est précis. De nombreuses expressions ont un score supérieur à 0,9, les plus nuancées ont un score de 0,8, (se référer à McDuff *et al.* [2016] afin d'obtenir une revue détaillée du système Affdex).

4.3.2 Participants

52 participants ont été recrutés pour notre expérimentation, âgés de 18 à 49 ans ($M=25,29$; $SD=7,663$). Ce panel était composé de 42 femmes et de 10 hommes, soit 80,8% de femmes. Ces participants sont des étudiants de deuxième année (30 étudiants) et de troisième année (22 étudiants) des Instituts de Formation en Soins Infirmiers de la Région Nouvelle-Aquitaine. La mixité de notre étude s'est vue limitée par la répartition des étudiants dans cette filière. Les femmes y sont majoritairement représentées. À titre d'information, en 2014, 83% des effectifs étaient des femmes parmi les étudiants infirmiers^{2 3} (Figure 4.4).

1. Ce dispositif a été conçu initialement par Rana el Kaliouby, ainsi que par Rosalind Picard, au sein du MIT Media Lab - www.affectiva.com/.

2. Panoramas de la Drees Santé : Portrait des professionnels de santé, édition 2016 - www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/62022/1/panoramasante_prof_2016.pdf

3. Étude de la Drees : La profession d'infirmière : situation démographique et trajectoires professionnelles - Edition 2011 - <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/er759.pdf>

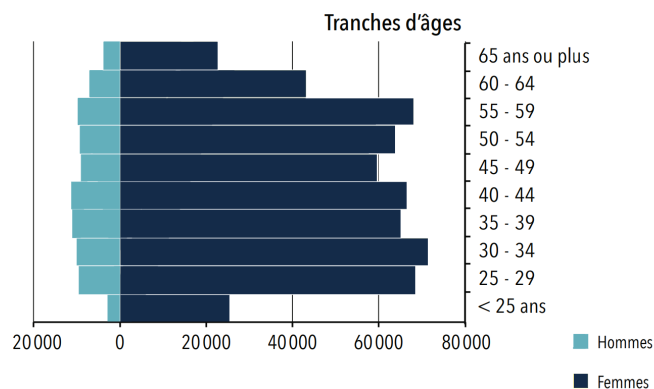


FIGURE 4.4 – Répartition homme-femme et pyramide des âges en 2015 pour la profession infirmière ³

Le tableau ci-dessous détaille les établissements ayant accepté de mobiliser leurs étudiants afin de participer à cette étude :

TABLEAU 4.1 – Tableau des établissements et nombre de participants ayant testés le simulateur

Établissement	Nombre de participants	Année de formation
IFSI de Limoges Croix-Rouge	10	2 et 3
IFSI de Rochefort	6	2
IFSI de Marmande	10	2
IFSI de Niort	3	2
IFSI de La Rochelle	7	3
IFSI de Poitiers	4	3
IFSI de Libourne	6	3
IFSI de Saintes	6	2

4.3.3 Procédure

Afin d'investiguer l'impact de l'expressivité de l'agent virtuel sur l'empathie chez l'utilisateur, les deux conditions dépendantes de l'expressivité de l'agent sont :

- Agent virtuel réaliste et expressif (AVRE), possédant des expressions faciales émotionnelles
- Agent virtuel réaliste (AVR), ne possédant pas d'expressions faciales.

Le simulateur est divisé en deux phases, appelées des situations. Les participants testent les deux situations successivement, toutefois celles-ci sont différentes et seront considérées indépendamment. Selon la situation, chaque groupe de participants teste une des deux conditions d'expressivité de l'agent virtuel (Tableau 4.2). L'analyse est effectuée selon un plan

expérimental inter-sujet, en opposant le groupe A et le groupe B pour une même situation.

TABLEAU 4.2 – Organisation des passations lors de la simulation

	AVRE	AVR
Situation 1	Groupe A	Groupe B
Situation 2	Groupe B	Groupe A

Dans un premier temps, chaque participant complète un formulaire de consentement puis l'expérimentateur invite le participant à s'installer face à l'ordinateur et lui fournit les instructions nécessaires à la passation.

Phase 1 : Recueil de données

Lors de cette phase, le participant remplit un questionnaire de pré-passation afin de recueillir des informations démographiques, susceptibles de nous fournir des informations sur les profils des participants et leur niveau d'aisance avec les outils numériques.

Ensuite, le participant doit compléter un questionnaire d'auto-évaluation concernant son humeur : l'échelle d'affectivité positive et d'affectivité négative (PANAS) [Thompson, 2007; Watson *et al.*, 1988]. Cela ayant pour but de déterminer s'il est prédisposé à être empathique, l'humeur étant un des facteurs de modulation de l'empathie [Davis, 1983; De Vignemont et Singer, 2006; Paiva *et al.*, 2017].

Enfin, avant de débiter l'expérimentation, le participant répond à quelques questions relatives à son empathie au quotidien. Ces questions sont issues du questionnaire d'auto-évaluation sur l'empathie affective et cognitive [Reniers *et al.*, 2011].

Phase 2 : Tutoriel

La formation dispensée grâce au simulateur débute lors de cette phase. Afin de prendre connaissance de l'interface et des éléments la composant, le participant visualise un court tutoriel intégré au sein de l'application.

Phase 3 : Situation 1

Cette première situation a pour objectif pédagogique de mesurer la capacité de la patiente à réaliser les activités de la vie quotidienne, comme sa toilette, et de l'accompagner dans ses soins. Lors de cette situation, les apprenants doivent prendre en charge la patiente, notamment en conversant avec elle et en l'interrogeant sur ses habitudes et ses préférences. Cette situation comprend un dialogue avec deux échanges prédéfinis et six questions pour lesquelles l'étudiant

doit choisir la réponse la plus appropriée en tant que soignant et correspondant aux besoins et aux préférences de la patiente virtuelle. Cet exercice implique que l'apprenant réfléchisse aux soins à prodiguer et à l'état psychologique de la patiente, afin de lui apporter une réponse adaptée (Annexe C.3).

Durant cette phase, les expressions faciales du participant sont captées grâce à la webcam, pour analyser ses réactions émotionnelles afin de déterminer s'il y a potentiellement un signe d'empathie affective (imitation, contagion émotionnelle).

À la fin de la situation 1, le participant doit répondre aux questions, contextualisées par rapport à l'étude, du questionnaire sur l'empathie affective et cognitive (QCAE) de Reniers *et al.* [2011]. Suite au questionnaire sur l'empathie, l'apprenant répond à une question sur le lien affectif potentiellement développé envers la patiente et à deux questions sur le sentiment de similarité perçu, ces notions font partie des facteurs de modulation de l'empathie (voir Section 2.4.2). Enfin, le participant complète un questionnaire sur les dimensions de la présence sociale [Harms et Biocca, 2004] et sur l'engagement [O'Brien *et al.*, 2018].



FIGURE 4.5 – Illustration de la patiente virtuelle lors de la situation 1 du simulateur en santé

Phase 4 : Situation 2

La situation 2 du simulateur débute avec une chambre des erreurs puis l'apprenant échange avec la patiente qui lui fait part de ses douleurs. L'apprenant doit prendre en charge l'organisation du soin. Cette situation comprend huit échanges prédéfinis avec la patiente, ainsi que deux questions pour lesquelles il doit choisir la solution la plus appropriée. Durant cette phase, les expressions faciales de l'utilisateur sont également captées. L'utilisateur doit de nouveau répondre aux questionnaires liés à l'empathie, à la similarité, à la présence sociale et à l'engagement.

Dans les deux situations, les dialogues prédéfinis sont des échanges avec la patiente qui se déclenchent sans intervention de l'utilisateur, alors que les questions nécessitent que l'utilisateur choisisse l'échange le plus approprié entre trois voire quatre propositions. La première situation comprend seulement deux échanges prédéfinis, mais elle contient six questions impliquant que l'apprenant réfléchisse aux besoins ainsi qu'aux souhaits de la patiente. Il doit imaginer et se projeter afin de comprendre l'état mental de la patiente. La deuxième situation, quant à elle, possède seulement deux questions, mais elle contient plus d'échanges prédéfinis. Lors de ces échanges prédéfinis, l'utilisateur n'intervient pas, toutefois l'état de la patiente virtuelle lui est dévoilé durant le dialogue. De ce fait, les deux situations possèdent des contextes différents et nécessitent une implication différente de la part de l'utilisateur.

Phase 5 : Questionnaire post-expérimentation

À la fin de la simulation, le participant doit répondre à un questionnaire post-expérimentation ayant pour but de recueillir son avis, notamment en ce qui concerne son ressenti envers les agents virtuels et leur expressivité. Ce questionnaire comprend également des questions ouvertes permettant aux participants de rédiger des remarques librement afin de partager leurs ressentis.

4.3.4 Mesures

Bien qu'elle fasse partie intégrante des interactions humaines, l'empathie reste une notion complexe et difficile à mesurer. Nous supposons que la composante affective de l'empathie est plus propice à être mesurée avec une méthode quantitative objective telles que des mesures psycho-physiologiques ou comportementales, et que l'empathie cognitive se prête plus à des mesures subjectives. En conséquence et afin d'obtenir des résultats représentatifs, nous avons opté pour l'utilisation conjointe de mesures objectives et subjectives dans l'objectif d'obtenir un maximum d'informations sur l'expérience vécue par l'utilisateur et de concorder avec les deux composantes de l'empathie. Nous utilisons deux conditions d'expressivité afin de permettre une comparaison entre les situations confrontant l'utilisateur à un agent virtuel possédant des expressions faciales émotionnelles (AVRE) ou à un agent sans expressions faciales (AVR). Les participants complètent des questionnaires identiques qui seront utilisés pour étudier les éventuels impacts de l'expressivité faciale sur les dimensions prises en compte. Suite aux passations, l'ensemble de ces données sont stockées dans un fichier CSV⁴.

Les données enregistrées portent sur :

4. Le format CSV (Comma-Separated Values) est un format informatique ouvert représentant des données tabulaires sous forme de valeurs séparées par des virgules.

- **Informations sur chaque participant** : genre, âge, année correspondant au cursus scolaire

- **Habitudes concernant les outils numériques** : Il y a 4 items concernant l'aisance des participants avec les outils numériques. Leurs réponses sont évaluées à l'aide d'une échelle de Likert à 5 points.

- **Affectivité positive et négative** : Nous évaluons l'état émotionnel du participant en utilisant l'échelle PANAS dans sa version condensée (10 items) [Thompson, 2007; Watson *et al.*, 1988]. Cette échelle fournit des mesures sur les affects positifs (PA) et les affects négatifs (NA) des utilisateurs. Il s'agit de deux facteurs indépendants. Un score d'affect négatif élevé révèle potentiellement une détresse psychologique impliquant une variété d'émotions déplaisantes, alors qu'un score bas reflète le calme et la sérénité [Watson *et al.*, 1988]. Les réponses à ce questionnaire sont évaluées avec une échelle de Likert à 5 points. Ce questionnaire permet d'avoir un indicateur de l'humeur du participant, qui est un facteur de modulation de l'empathie [Paiva *et al.*, 2017].

- **Empathie cognitive et affective** : Le questionnaire QCAE est divisé en cinq dimensions dépendantes de l'empathie cognitive et affective (voir Section 2.2.3). Plus le score est élevé, plus le participant se considère empathique. Les items du questionnaire concernent l'empathie de l'utilisateur au quotidien ou sont contextualisés par rapport à l'expérience. Ces 31 items sont évalués à l'aide d'une échelle de Likert composée de 4 points, tel que recommandé par Reniers *et al.* [2011] (Annexe C.4). L'empathie cognitive contient 19 items et aborde les notions de :

- prise de perspective (PP) : tendance spontanée à se mettre à la place d'autrui et à adopter son point de vue psychologique (10 items donc le cumul varie de 10 à 40 points) ;
- simulation (S) : tendance à se mettre à la place d'autrui en imaginant ce qu'il ressent et ses intentions futures (9 items donc le cumul varie de 9 à 36 points).

L'empathie affective concerne 12 items, et aborde les notions de :

- contagion émotionnelle (CE) : reflet automatique de l'état émotionnel d'autrui (4 items donc le cumul varie de 4 à 16 points) ;
- réactivité proximale (RPR) : réponse émotionnelle à l'observation de l'état émotionnel d'autrui faisant parti d'un contexte social proche (4 items donc le cumul varie de 4 à 16 points) ;
- réactivité périphérique (RPE) : réponse émotionnelle à l'observation de l'état émotionnel d'autrui faisant parti d'un contexte social éloigné (4 items donc le cumul varie de 4 à 16 points).

- **Lien affectif et sentiment de similarité** : Dans la littérature, ces notions sont généralement adressées par des évaluations subjectives telles que dans l'étude de Hall *et al.* [2005b]. Nous avons formulé deux items concernant le sentiment de similarité et un item concernant un potentiel lien affectif, en lien avec les facteurs de modulation de l'empathie pouvant nous aider à la compréhension de l'impact de l'expressivité des agents sur les réactions empathiques des utilisateurs. Ils sont évalués à l'aide d'une échelle de Likert en 5 points :

- *J'étais à l'aise face à cette patiente virtuelle. Ces réactions m'ont semblées appropriées et naturelles.*
- *Cette patiente virtuelle pourrait ressembler ou me faire penser à un de mes patients.*
- *J'ai apprécié les échanges avec cette patiente virtuelle.*

- **La présence sociale** : nous utilisons deux dimensions du questionnaire « *The Networked Mind Measure of Social Presence* » de Biocca *et al.* [2001]. Chacune de ces dimensions contient trois items évalués à l'aide d'une échelle de Likert (Annexe C.5). La première dimension correspond à la co-présence (CP) dans laquelle le participant est conscient des autres agents virtuels et croit qu'il n'est pas seul ou isolé. La deuxième dimension concerne l'interdépendance émotionnelle perçue (IEP), qui est la mesure dans laquelle les états émotionnels de l'agent virtuel affectent l'utilisateur.

- **L'engagement** : Nous utilisons 6 items du questionnaire portant sur l'engagement utilisateur de O'Brien *et al.* [2018]. Ces 6 items concernent les notions d'esthétique (E) et de satisfaction (Sa). L'esthétique correspond à l'attractivité et l'attrait visuel de l'interface. La satisfaction est une dimension qui aborde le succès global de l'application et l'intérêt de l'utilisateur pour l'interaction (Annexe C.5). Notre revue de littérature n'a pas permis de mettre en avant l'existence d'un questionnaire fiable et validé concernant l'engagement empathique. De plus, les études évoquées concernant l'empathie, la présence sociale et l'engagement au sein de notre revue de littérature, n'étaient pas relatifs à l'engagement empathique, mais bien à l'engagement utilisateur. C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser ce questionnaire.

Dans un second fichier CSV, nous récoltons des données concernant la captation d'expressions faciales. Pour chaque échange avec la patiente, le document contient l'ID de référence de la question posée à la patiente virtuelle, le type d'expressions faciales émotionnelles exprimées par la patiente, ainsi que des moyennes concernant les zones faciales activées et les émotions exprimées par l'utilisateur lors de cet échange. Cela a pour but de déterminer si le participant a eu une réaction faciale lorsqu'il était confronté à l'état émotionnel de la patiente virtuelle. Les émotions analysées sont les six émotions de base [Ekman, 2007; Ekman et Friesen, 1978], (Annexe C.2).

Enfin, le questionnaire post-expérimentation est complété par les participants pour recueillir leur ressenti subjectif (Annexe C.6). La récolte de ces données a notamment pour objectif de fournir des informations complémentaires sur les choix des participants. Cela a pour but d'alimenter notre discussion et de proposer une analyse plus aboutie concernant l'expérience vécue par l'utilisateur.

4.3.5 Hypothèses

Au regard de notre revue de littérature, nous avons émis quatre hypothèses :

- H1 : L'expressivité faciale des agents virtuels impacte l'induction d'empathie de l'utilisateur.
- H1.1 : Les agents virtuels expressifs impactent l'empathie cognitive du participant.
- H1.2 : Les agents virtuels expressifs impactent l'empathie affective du participant.
- H2 : Les agents virtuels expressifs renforcent le sentiment de similarité et le lien affectif de l'utilisateur.
- H3 : L'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte le sentiment de présence sociale de l'utilisateur.
- H4 : L'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte l'engagement de l'utilisateur.

4.4 Résultats

4.4.1 Humeur et habitudes

Une analyse statistique des habitudes numériques des participants a été effectuée. Sur une échelle de Likert à 5 points (5 = tout à fait d'accord, 1 = pas du tout d'accord), les participants sont en moyenne à l'aise avec des outils numériques, tels que des smartphones, tablettes ou ordinateurs ($M = 4,23$; $SD = 0,807$). Toutefois, les participants ont indiqué une faible habitude des simulateurs ($M = 1,73$; $SD = 0,744$), évaluée à partir d'une échelle de Likert en 5 points (5 = très régulièrement, 1 = jamais). Notons que 86,5% des participants ont déclaré avoir rarement ou jamais utilisé de simulateurs.

Avant de débiter le simulateur, nous avons souhaité évaluer l'humeur du participant afin de déterminer si le participant est prédisposé à être empathique. Plus précisément, nous avons déterminé les affects positif et négatif des participants grâce aux items de l'échelle PANAS (Tableau 4.3). Les résultats respectifs de l'affectivité positive et de l'affectivité négative peuvent varier de 5 à 25 points. Dans notre étude, le score moyen d'affectivité positive, obtenu à partir de l'addition des affects positifs, est élevé ($M = 16,2$; $SD = 3,139$). Le score moyen d'affectivité négative des participants est faible ($M = 6,8$; $SD = 2,152$). D'après Watson *et al.* [1988], un score élevé d'affectivité positive est représentatif d'un état de concentration, d'énergie et d'engagement positif, le score bas d'affectivité négative reflète un état de sérénité et de calme.

TABLEAU 4.3 – Résultats moyens concernant les humeurs des participants (Échelle de Likert sur 5 points)

Affect	Positif (P)		
	Négatif (N)	\bar{x}	σ
Bouleversé	N	1,19	0,525
Hostile	N	1,17	0,550
Vigilant	P	2,67	0,964
Honteux	N	1,23	0,509
Inspiré	P	2,67	0,923
Nerveux	N	2,04	1,028
Déterminé	P	3,35	0,883
Attentif	P	3,87	0,742
Apeuré	N	1,17	0,474
Actif	P	3,65	0,947

Corrélation humeur, âge et empathie

Suite à l'analyse de ces résultats, nous avons effectué une analyse statistique entre l'humeur et le score d'empathie des participants obtenu à l'aide du questionnaire QCAE, afin de prendre connaissance d'une éventuelle corrélation. Nous prenons également en compte l'âge des participants afin d'analyser une potentielle corrélation entre l'âge et l'empathie telle qu'évoquée au sein de notre revue de littérature (voir Section 2.4.2). Nous effectuons tout d'abord le test de Kolmogorov-Smirnov et le test de Levene afin de vérifier la normalité et l'homogénéité de la distribution des données dans la situation 1 et dans la situation 2. Les résultats de ceux-ci nous permettent de choisir le test de Pearson pour la situation 1 (tableau 4.4) et pour la situation 2 (Tableau 4.5).

TABLEAU 4.4 – Tableau de corrélation concernant l'affectivité positive et négative, l'âge et les dimensions de l'empathie pour la situation 1 (Affectivité Positive - AP, Affectivité Négative - AN, Prise de perspective - PP, Simulation - S, Contagion Émotionnelle - CE, Réactivité proximale - RPR, Réactivité périphérique - RPE)

	AP	AN	Âge	PP	S	CE	RPR	RPE
AP	-	-0,011	0,097	-0,006	0,155	-0,067	0,210	0,094
AN		-	-0,023	-0,137	-0,083	0,248	0,068	-0,145
Âge			-	-0,186	-0,374**	-0,444**	-0,279*	-0,001
PP				-	0,345*	0,093	0,060	0,010
S					-	0,422**	0,326*	0,217
CE						-	0,519**	0,153
RPR							-	0,422**
RPE								-

* La corrélation est significative si $p < 0,05$; ** La corrélation est significative si $p < 0,01$

Nos résultats ne révèlent pas de corrélation entre l'empathie et l'affectivité positive ou négative lors de la situation 1. Toutefois, nous observons des corrélations négatives entre l'âge et la dimension de simulation $\rho = -0,374$, $n = 52$, $p = 0,006$, l'âge et la contagion émotionnelle $\rho = -0,444$, $n = 52$, $p = 0,001$ ainsi que l'âge et la réactivité proximale $\rho = -0,279$, $n = 52$, $p = 0,045$.

TABLEAU 4.5 – Tableau de corrélation concernant l'affectivité positive et négative, l'âge et les dimensions de l'empathie pour la situation 2 (Affectivité Positive - AP, Affectivité Négative - AN, Prise de perspective - PP, Simulation - S, Contagion Émotionnelle - CE, Réactivité proximale - RPR, Réactivité périphérique - RPE)

	AP	AN	Âge	PP	S	CE	RPR	RPE
AP	-	-0,011	0,097	0,080	0,099	-0,160	0,210	0,094
AN		-	-0,023	-0,233	0,054	0,108	0,068	-0,145
Âge			-	-0,167	-0,339*	-0,464**	-0,279*	-0,001
PP				-	0,377**	0,175	0,221	0,213
S					-	0,494**	0,464**	0,282*
CE						-	0,419**	0,001
RPR							-	0,422**
RPE								

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Pour la situation 2, nous observons également des corrélations négatives entre l'âge et la dimension de simulation $rho = -0,339$, $n = 52$, $p = 0,014$, l'âge et la contagion émotionnelle $rho = -0,464$, $n = 52$, $p = 0,001$ ainsi que l'âge et la réactivité proximale $rho = -0,279$, $n = 52$, $p = 0,045$. Pour conclure, que ce soit concernant la situation 1 ou la situation 2, il existe des corrélations entre l'âge du participant et son score d'empathie : plus le participant est âgé et moins son score d'empathie est élevé.

4.4.2 Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'empathie

Dans l'objectif de déterminer si l'expressivité des agents impacte l'empathie des utilisateurs, nous avons effectué une analyse inférentielle. Nous avons utilisé le test de Kolmogorov-Smirnov et le test de Levene afin de vérifier la normalité et l'homogénéité de la distribution des données. Le test de Levene ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des variances. Par conséquent, nous utilisons des tests paramétriques. Nous avons effectué des Tests t pour échantillons indépendants. Les résultats sont considérés comme significatifs quand $p < 0,05$. Nous ne considérons pas les items relatifs à l'empathie au quotidien de l'utilisateur car ces derniers ne sont pas contextualisés. Ils ne sont donc pas adaptés au cas d'usage, ces items correspondent à 3 items de la prise de perspective et aux items des dimensions de réactivité proximale et périphérique. Nous ne considérons donc que 7 des 10 items de la prise de perspective (PP-7) dans cette analyse.

Nous avons analysé l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie dans la situation 1. La comparaison des scores d'empathie est effectuée entre le groupe de parti-

cipants utilisant le simulateur intégrant un agent virtuel réaliste et expressif (AVRE) et le groupe utilisant le simulateur intégrant le même agent virtuel réaliste, cependant celui-ci est dépourvu de toute expressivité faciale (AVR).

Concernant la première situation, nos résultats révèlent une différence significative concernant la prise de perspective (PP-7), composante de l'empathie cognitive, en faveur de l'agent virtuel réaliste et expressif (AVRE) ($Z = 2,280$; $p = 0,027$). L'expressivité de l'agent impacte l'empathie cognitive de l'utilisateur (Tableau 4.6).

TABLEAU 4.6 – Impact de l'expressivité des agents virtuels réalistes sur les dimensions de l'empathie

	AVRE		AVR		p
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	
Prise de perspective (PP-7)	19,08	1,671	18,04	1,612	0,027
Simulation (S)	30,81	2,684	30,38	2,858	
Contagion émotionnelle (CE)	9,77	2,471	8,81	2,546	

Le seuil de significativité est reporté quand $p < 0,05$.

Nous avons utilisé les mêmes tests statistiques pour la seconde situation. Toutefois, nous n'observons pas de différences significatives concernant l'impact de l'expressivité sur l'empathie de l'utilisateur dans la situation 2. Ces premiers résultats nous laissent supposer que les contextes présentés au sein des deux situations impactent l'empathie de l'utilisateur. De ce fait, nous avons comparé l'empathie des participants dans la situation 1 et dans la situation 2. Nous avons utilisé le test de Kolmogorov-Smirnov pour vérifier la normalité de distribution et le test de Levene pour l'homogénéité des données. Les données suivent une distribution normale ($p > 0,05$ pour la majorité des variables testées) et le test de Levene ne permet pas de rejeter l'hypothèse d'homogénéité des variances. De ce fait, nous avons effectué des Tests t pour échantillons indépendants. Les résultats sont considérés comme significatifs quand $p < 0,05$.

Il existe une différence significative concernant la simulation en faveur de la situation 1 pour les participants interagissant avec l'AVRE ($Z = 2,917$; $p = 0,005$) ainsi que pour les participants qui interagissent avec l'AVR ($Z = 2,323$; $p = 0,024$), et une différence significative pour l'AVR concernant la prise de perspective en faveur de la situation 2 ($Z = -3,133$; $p = 0,003$). Ces résultats démontrent l'impact du contexte sur l'empathie de l'utilisateur. Nous supposons que cela est lié à la nature des interactions. Dans la situation 1, le participant est amené à réfléchir aux questions les plus appropriées à poser à la patiente. Il a peu d'informations sur son état émotionnel et doit s'imaginer à la place de celle-ci, ce qui correspond à la notion de simulation définie par Reniers *et al.* [2011]. Cette situation nécessite d'être attentif

aux réactions de la patiente afin de pouvoir lui apporter des réponses adaptées. Contrairement à la situation 1, la situation 2 est composée majoritairement de dialogues prédéfinis où la patiente fait part de son mal-être. L'apprenant n'a pas le choix concernant les réponses à apporter à la patiente, il a principalement une position de spectateur lors de la situation 2. L'état émotionnel de la patiente lui est indiqué directement sans action particulière de sa part. Il n'est pas tenu d'imaginer cet état, il peut adopter spontanément le point de vue psychologique de patiente, ce qui est en lien avec la notion de prise de perspective décrite par Reniers *et al.* [2011].

Pour résumer, l'expressivité de l'agent favorise l'empathie cognitive, notamment la dimension de prise de perspective lors de la situation 1. Cependant, l'impact du contexte est à prendre en considération, car celui-ci peut influencer les réactions empathiques de l'utilisateur [De Vignemont et Singer, 2006; Paiva *et al.*, 2017].

Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur les réactions émotionnelles des participants

Lors de la captation des expressions faciales des participants, nous avons un total de 52 participants. Nous avons été contraints de retirer un participant pour lequel la captation d'expression faciale ne s'est pas activée suite à un dysfonctionnement de la caméra.

Parmi les 51 participants restants, il y a 27 participants ayant eu des réactions émotionnelles au sein de la situation 1 et 26 participants ayant eu des réactions émotionnelles au sein de la situation 2. Cela signifie que le plugin Affdex indique avoir capté une expression faciale lors des échanges avec la patiente virtuelle. Afin de limiter les erreurs, nous avons fixé un seuil d'intensité à 10%, nous ne prenons pas en compte les expressions faciales en dessous de ce seuil. Il y a eu un total de 70 réactions émotionnelles au cours des échanges de la situation 1, nous avons souhaité considérer ces réponses afin de comprendre si celles-ci tendent à s'apparenter à de l'imitation. Pour les participants confrontés à l'AVRE lors de la première situation, il y a eu 10 potentielles imitations faciales sur 27 réactions, c'est-à-dire que d'après la captation d'expressions faciales, le participant a réagi avec la même émotion que celle exprimée par la patiente. Par exemple, lors du premier échange avec la patiente réaliste et expressive, celle-ci salue l'utilisateur, elle sourit et indique qu'elle est contente de le voir. Lors de cet échange, nous avons répertorié 6 participants ayant eu une expression faciale émotionnelle dont 4 ayant une expression de joie, avec une intensité variant de 14 à 81% selon les participants.

Malgré l'intérêt potentiel de ces données, elles ne suffisent pas, seules, à effectuer une analyse fiable. L'expression faciale émotionnelle captée peut paraître semblable à celle de

la patiente sans que cela corresponde à une réelle imitation. C'est pourquoi, il serait intéressant d'effectuer de nouvelles captations d'expressions faciales couplées à des mesures psycho-physiologiques.

4.4.3 Sentiment de similarité et lien affectif

Nous avons analysé l'impact de l'expressivité faciale des agents sur le sentiment de similarité et le lien affectif de l'utilisateur envers l'agent. Ces dimensions sont obtenues par l'analyse des réponses à respectivement 2 et 1 items. Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé afin de vérifier la normalité de la distribution des données pour la situation 1 ainsi que pour la situation 2. Les données ne suivent pas une distribution normale ($p < 0,05$). Afin de comparer les scores concernant le sentiment de similarité et le développement d'un lien affectif selon l'expressivité de l'agent, nous avons utilisé le test de Mann-Whitney.

Les tests n'ont pas révélé de différences significatives concernant les items abordant le sentiment de similarité et le développement d'un lien affectif entre AVRE et AVR lors de la situation 1. Les tests n'ont également pas révélé de différences significatives en rapport avec ces items entre AVRE et AVR lors de la situation 2. L'expressivité faciale de la patiente ne semble pas impacter l'affectivité et la similarité. Nous supposons que les participants considèrent la patiente dans sa globalité, l'impact de l'expressivité faciale est léger face à l'ensemble du contexte émotionnel communiqué par la patiente et par le simulateur.

Toutefois, les scores moyens liés au sentiment de similarité et au lien affectif sont élevés ($M > 4$ sur une échelle de Likert à 5 points pour les 3 items), indépendamment de l'expressivité de l'agent. Cela semble indiquer que chaque modalité permet un sentiment de similarité et potentiellement le développement d'un lien affectif, confirmant que les caractéristiques et la relation mise en place avec l'agent virtuel sont des éléments importants pour l'utilisateur.

En moyenne, les participants ont déclaré être à l'aise face à la patiente virtuelle, ses réactions leur ont paru appropriées (situation 1 : $M = 4,29$; $SD = 0,696$; situation 2 : $M = 4,08$; $SD = 0,763$). Les participants ont également indiqué que cette patiente pourrait ressembler ou leur faire penser à un de leurs patients (situation 1 : $M = 4,13$; $SD = 0,864$; situation 2 : $M = 4,12$; $SD = 0,90$). De plus, en moyenne, les participants sont en capacité de développer de l'affection envers la patiente, ils ont majoritairement apprécié les échanges avec elle (situation 1 : $M = 4,33$; $SD = 0,648$; situation 2 : $M = 4,21$; $SD = 0,723$).

4.4.4 Sentiment de présence sociale et engagement

Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé afin de vérifier la normalité de la distribution des réponses au questionnaire de sentiment de présence sociale ainsi qu'au questionnaire d'engagement. Les variables ne suivent pas une distribution normale ($p < 0,05$), nous appliquons donc des tests non-paramétriques. Le test de Mann-Whitney est utilisé dans le but de comparer les réponses aux questionnaires selon l'expressivité de l'agent virtuel.

L'évaluation des questions relatives à des sous-catégories de la présence sociale (co-présence et interdépendance émotionnelle perçue) et de l'engagement (notion d'esthétisme et de satisfaction) ne révèle pas de différences significatives selon l'expressivité de l'agent virtuel entre AVRE et AVR lors de la première situation. Les mêmes tests statistiques ont été effectués pour la situation 2 et n'ont pas révélé de différences significatives. D'après les résultats de notre étude, il n'y a pas d'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur les composantes évaluées du sentiment de présence sociale et de l'engagement de l'utilisateur.

Corrélation présence sociale, engagement et empathie

Il est intéressant de noter que les scores moyens des sous-catégories sont élevés dans les deux situations, que ce soit face à l'AVRE ou l'AVR. Dans la première situation, c'est notamment le cas pour le score de co-présence (AVRE : $M = 4,68$; $SD = 0,473$ et AVR : $M = 4,61$; $SD = 0,454$). Nous supposons un lien entre les scores de présence sociale, d'engagement et d'empathie. Ainsi, nous avons effectué des tests de corrélation à l'aide de tests non-paramétriques, car les données ne suivent pas une distribution normale d'après le test de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$ pour la majorité des variables testées). Nous utilisons le test de corrélation de Spearman pour la situation 1 (Tableau 4.7) et pour la situation 2 (Tableau 4.8).

TABLEAU 4.7 – Extrait de la matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 1. (Co-présence - CO, Interdépendance émotionnelle perçue - IEP, Esthétique - E, Satisfaction - Sa)

	CO	IEP	E	Sa
Prise de perspective	0,136	0,245	0,436**	0,330*
Simulation	0,284*	0,481**	0,361**	0,213
Contagion émotionnelle	0,371**	0,577**	0,240	0,212
Réactivité proximale	0,318*	0,348*	0,366**	0,166
Réactivité périphérique	0,126	0,153	0,132	-0,076

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

TABLEAU 4.8 – Extrait de la matrice de corrélation des dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 2. (Co-présence - CO, Interdépendance émotionnelle perçue - IEP, Esthétique - E, Satisfaction - Sa)

	CO	IEP	E	Sa
Prise de perspective	0,162	0,414**	0,361**	0,258
Simulation	0,395**	0,461**	0,546**	0,488**
Contagion émotionnelle	0,249	0,654**	0,189	0,236
Réactivité proximale	0,224	0,517**	0,395**	0,256
Réactivité périphérique	0,064	0,272	0,276*	0,117

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Nos résultats démontrent des corrélations positives entre les dimensions d'empathie, de présence sociale et d'engagement. Nous décrivons les corrélations communes aux deux situations ci-dessous :

- Co-présence

Nous observons de faibles corrélations positives entre la dimension de co-présence et la dimension de simulation, lors de la situation 1 ($\rho = 0,284$, $n = 52$, $p = 0,041$) et lors de la situation 2 ($\rho = 0,395$, $n = 52$, $p = 0,004$). Nous supposons que plus le sentiment de co-présence est important, plus le score de l'empathie des utilisateurs est élevé.

- Interdépendance émotionnelle

Il existe des corrélations positives modérées entre l'interdépendance émotionnelle et la dimension de simulation dans la situation 1 ($\rho = 0,481$, $n = 52$, $p < 0,001$) ainsi que dans la situation 2 ($\rho = 0,461$, $n = 52$, $p = 0,001$). Nous observons également une corrélation positive modérée entre l'interdépendance émotionnelle et la dimension de contagion émotionnelle lors de la situation 1 ($\rho = 0,577$, $n = 52$, $p < 0,001$) ainsi qu'une forte corrélation lors de la situation 2 ($\rho = 0,654$, $n = 52$, $p = 0,012$). L'interdépendance émotionnelle et la dimension de réactivité proximale sont également corrélées positivement (situation 1 : $\rho = 0,348$, $n = 52$, $p = 0,012$; situation 2 : $\rho = 0,517$, $n = 52$, $p < 0,001$). Concernant le lien entre interdépendance émotionnelle et prise de perspective, une tendance est observée pour la situation 1, il existe une faible corrélation entre ces notions ($\rho = 0,245$, $n = 52$, $p = 0,080$), toutefois il y a une corrélation positive modérée entre ces dimensions pour la situation 2 ($\rho = 0,414$, $n = 52$, $p = 0,002$). Ainsi, plus l'interdépendance émotionnelle perçue par l'utilisateur est importante, plus son score d'empathie est élevé. L'interdépendance émotionnelle correspondant à une influence des états émotionnels de l'agent sur l'utilisateur, la corrélation avec les dimensions d'empathie est compréhensible.

- Esthétique

Il existe une corrélation entre la notion d'esthétique et l'empathie cognitive de l'utilisateur, notamment concernant les dimensions de prise de perspective (situation 1 : $\rho = 0,436$, $n = 52$, $p = 0,001$; situation 2 : $\rho = 0,361$, $n = 52$, $p = 0,009$). Nous observons également une faible corrélation avec la notion de simulation lors de la situation 1 : $\rho = 0,361$, $n = 52$, $p = 0,009$) ainsi qu'une corrélation modérée lors de la situation 2 ($\rho = 0,546$, $n = 52$, $p < 0,001$). Nous observons enfin une corrélation positive avec la dimension de réactivité proximale (situation 1 : $\rho = 0,366$, $n = 52$, $p = 0,008$; situation 2 : $\rho = 0,395$, $n = 52$, $p = 0,004$). En résumé, il semble qu'il existe un lien avec l'appréciation de l'aspect esthétique et les scores d'empathie liés à la prise de perspective, la simulation et la réactivité proximale.

Enfin, nous observons également des corrélations positives dans une des situations, alors qu'elles ne sont que des tendances dans l'autre situation. Ces corrélations concernent les dimensions de co-présence et de contagion émotionnelle, ainsi que les notions de satisfaction et de prise de perspective (Annexe C.7). Nous supposons que les différences entre les corrélations sont influencées par le contexte des situations.

Pour résumer, considérées ensemble, les analyses de corrélation ont montré qu'il existe des liens entre les dimensions de présence sociale, d'engagement et d'empathie.

Questionnaire post-expérimentation

Nous avons effectué une analyse statistique afin de comparer les ressentis des participants concernant leur implication émotionnelle face à la patiente virtuelle, l'expressivité de la patiente virtuelle, ainsi que l'empathie ressentie pour cette patiente, dans la situation 1 et dans la situation 2 (Annexe C.6). Le tableau suivant contient les moyennes aux réponses des participants, évaluées avec des échelles de Likert à 5 points (1 = Pas du tout d'accord, 5 = Tout à fait d'accord) (Tableau 4.9).

Afin d'effectuer une analyse inférentielle et de comparer ces données, le test de Kolmogorov-Smirnov a été effectué pour vérifier la normalité de la distribution des réponses au questionnaire post-passation. Les données ne suivent pas une distribution normale ($p < 0,05$ pour toutes les variables testées), nous avons utilisé le test Mann Whitney, qui n'a pas révélé de différences significatives entre les agents virtuels.

TABLEAU 4.9 – Résumé des réponses des participants au questionnaire post-expérimentation

Situation 1	AVRE		AVR	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Implication émotionnelle	3,58	1,027	3,58	0,857
Expressivité de la patiente	3,81	1,059	3,27	1,282
Empathie ressentie	3,92	1,017	3,85	0,925
Situation 2				
Implication émotionnelle	3,73	0,827	3,62	1,023
Expressivité de la patiente	3,62	0,941	3,38	1,203
Empathie ressentie	4,00	0,693	3,96	0,871

Enfin, les participants ont indiqué que ce type de simulateur leur semblait bénéfique pour la formation en soins infirmiers ($M = 4,42$; $SD = 0,696$). De plus, ils soulignent que l'expressivité de la patiente virtuelle leur semble être un élément important pour la conception d'un simulateur en soins infirmiers ($M = 4,5$; $SD = 0,728$).

4.5 Discussion

4.5.1 Empathie

Dans la lignée des recherches antérieures sur l'empathie et les agents virtuels [De Rosis *et al.*, 2005; Deladisma *et al.*, 2007; Paiva *et al.*, 2005; Volonte *et al.*, 2016], les résultats de notre expérimentation concernant le score d'empathie des participants est élevé, indépendamment des modalités d'expressivité et des situations (empathie affective $M = 33,21$ sur 48 points max. ; $SD = 4,25$; empathie cognitive $M = 57,78$ sur 76 points max. ; $SD = 3,75$). Ce taux élevé d'empathie suppose que les participants sont impliqués émotionnellement lors de cette simulation. Cette implication est signe d'un contexte émotionnel fort émanant du simulateur et des agents virtuels. D'après la littérature, une implication émotionnelle favorise la mémorisation et aboutit à un meilleur apprentissage [Tyng *et al.*, 2017; Veletsianos, 2009].

Selon notre revue de littérature, les caractéristiques de l'utilisateur, dont l'humeur et l'âge, impactent l'empathie [De Vignemont et Singer, 2006; Lennon et Eisenberg, 1987; Paiva *et al.*, 2017]. En effet, d'après une étude effectuée auprès d'internes en médecine, une humeur calme favorise l'empathie envers un patient alors que le stress par exemple ne favorise pas l'induction d'empathie [Joubert, 2014]. Dans ce sens, nos résultats montrent un score d'affectivité positive élevée, synonyme de concentration et d'énergie, et un score d'affectivité négative faible, représentatif d'un état de sérénité et de calme [Watson *et al.*, 1988]. Toutefois, nous n'avons pas observé de corrélation entre le score d'empathie et l'affectivité positive et négative quelle que soit la situation. Cependant, nous observons un impact de l'âge sur le score d'empathie. Nos résultats indiquent une corrélation négative entre l'âge des participants et les dimensions de simulation, de contagion émotionnelle et de réactivité proximale. Plus le participant est âgé, moins son score d'empathie est élevé. Les étudiants les plus âgés des Instituts de Formation en Soins infirmiers sont généralement en reconversion professionnelle ou « promotion professionnelle ». Cela concerne majoritairement les aides-soignants et les auxiliaires de puériculture. En lien avec l'âge, nous supposons que le parcours professionnel et l'expérience des participants ont pu influencer leurs réactions émotionnelles face à la patiente virtuelle.

Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'induction d'empathie

Il existe un lien entre l'expressivité des agents virtuels et l'empathie de l'utilisateur, tel que cela a été mis en avant dans les recherches sur les interactions humaines [Dimberg *et al.*, 2000; Drimalla *et al.*, 2019; Jospe *et al.*, 2018]. En adéquation avec la mise en place d'une situation empathique décrite par Paiva *et al.* [2017], nos résultats révèlent une différence significative relative au fait que l'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte la prise de perspective de l'utilisateur, composante de l'empathie cognitive ($Z=2,280$; $p=0,027$). Lors de la situation 1, la prise de perspective est plus importante lorsque l'utilisateur est face à l'agent virtuel réaliste et expressif que lorsqu'il est face à un agent virtuel réaliste sans expressivité faciale. Cette différence indique que l'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte l'utilisateur, celui-ci a tendance à adopter le point de vue psychologique de la patiente virtuelle. Ces résultats corroborent notre hypothèse 1.1.

Paiva *et al.* [2017] précisent dans leurs recherches que le degré d'expressivité de l'état affectif de l'agent virtuel est important, car il constitue un repère fondamental dans le processus d'empathie ; et que cet aspect est essentiel si l'agent virtuel représente un humain virtuel. En effet, les résultats de notre étude montrent que les participants sont légèrement plus empathiques lorsqu'ils sont face à des agents virtuels dotés d'expressions faciales émotionnelles.

Il est tout de même recommandé de prendre en considération les différences de contexte de l'étude, car ce sont des facteurs en mesure d'influencer les réactions empathiques [De Vignemont et Singer, 2006]. Cela est corroboré par l'étude comparative de l'induction d'empathie entre nos deux situations, au détriment de l'expressivité de l'agent virtuel. Il serait intéressant d'effectuer des études complémentaires au sujet de l'impact du contexte sur l'induction de l'empathie chez les utilisateurs de simulateurs, notamment en ce qui concerne les différents types d'interactions (dialogues prédéfinis ou choix des questions), le scénario, la narration ou encore la durée des simulateurs.

Impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur l'imitation et la contagion émotionnelle

Concernant l'impact de l'expressivité sur la contagion émotionnelle évaluée à l'aide du questionnaire QCAE, nous n'avons pas constaté de différences significatives entre l'agent virtuel réaliste et l'agent virtuel réaliste et expressif. Par ailleurs, lors de notre analyse des réactions émotionnelles issues de la captation des expressions faciales, il semble que certains participants aient eu des réactions émotionnelles en adéquation avec les états émotionnels exprimés par l'agent virtuel, notamment avec l'expression de la joie. Ces résultats sont dans la lignée des recherches précédentes sur les réactions émotionnelles des utilisateurs face à

des stimuli émotionnels [Schrammel *et al.*, 2009; Weyers *et al.*, 2006]. Des analyses avancées pourraient indiquer si cela s'apparente réellement à de l'imitation ou à de la contagion émotionnelle. Cependant, comme évoqué précédemment, au regard de la faible précision de ces données et en l'absence de différences significatives au questionnaire QCAE concernant l'empathie affective, notre hypothèse 1.2 ne peut être confirmée.

Dans leurs travaux sur l'impact des expressions faciales émotionnelles des agents virtuels, Ravaja *et al.* [2016] ont mis en avant une influence de l'expressivité sur les réponses émotionnelles de l'utilisateur (activité musculaire du visage), démontrée à l'aide de mesures physiologiques telles que l'électromyographie et l'électroencéphalographie. C'est également le cas dans l'étude récente de Philip *et al.* [2018], où les agents virtuels permettent de générer des stimuli émotionnels contrôlés pour induire des réactions faciales rapides chez l'utilisateur, notamment pour les émotions de colère et de joie. Il serait intéressant d'effectuer une étude supplémentaire avec des mesures avancées de l'empathie affective telles que des mesures physiologiques préconisées dans divers travaux de recherche antérieurs [Dimberg *et al.*, 2011; Neumann *et al.*, 2015; Neumann et Westbury, 2011].

Au regard de nos résultats, il serait également pertinent d'effectuer une étude complémentaire sur la représentation des émotions. Dans un contexte émotionnel fort (scénario, contexte, dialogue, etc.) et un panel peu initié aux simulateurs, il est complexe de déterminer si l'expressivité faciale doit être fidèle à celle d'un humain réel, ou si elle peut être intensifiée afin d'être perçue aussi efficacement que sur un humain. Nous supposons qu'intensifier les expressions pourrait provoquer chez l'utilisateur des réactions empathiques plus importantes, tout en évitant le phénomène de l'Uncanny Valley, tel que cela fut évoqué au sein des travaux de recherche de Mäkäräinen *et al.* [2014]. L'expressivité faciale de l'agent virtuel de notre étude ne semble pas impacter l'empathie affective. Cela nous laisse supposer que la représentation des émotions est probablement trop faible pour provoquer une réelle contagion émotionnelle.

4.5.2 Agent virtuel expressif, sentiment de similarité et lien affectif

Nos résultats ne démontrent pas de différences significatives sur le sentiment de similarité ou sur le potentiel lien affectif développé avec la patiente selon son expressivité faciale, nous ne sommes donc pas en mesure de confirmer l'hypothèse H2. Toutefois, nos résultats corroborent les observations précédentes de Hall *et al.* [2005b]; Vugt *et al.* [2010], les résultats moyens observés pour ces questions sur le lien affectif et la similarité présentent des valeurs proches de la maximale sur notre échelle (supérieures à 4 sur 5). Ces constats semblent démontrer

la possibilité pour un utilisateur d'éprouver le sentiment de similarité ainsi que d'apprécier échanger avec l'agent, indépendamment de son expressivité faciale. Cela confirme qu'il existe un intérêt majeur pour l'agent virtuel dans cette simulation.

4.5.3 Agent virtuel expressif, présence sociale et engagement

Les résultats de notre expérimentation ne révèlent pas d'impact de l'expressivité faciale sur le sentiment de présence sociale et sur l'engagement de l'utilisateur. L'expressivité de l'agent virtuel ne se limitant pas à son expression faciale émotionnelle, les utilisateurs peuvent être influencés par les dialogues avec l'agent, sa posture, son regard, son apparence ou encore ses expressions corporelles. Ces divers facteurs favorisent l'apparition d'un sentiment de présence et d'engagement chez l'utilisateur [Nowak et Biocca, 2003; Van Vugt *et al.*, 2007]. De ce fait, nous supposons que l'expressivité faciale n'impacte que faiblement l'utilisateur immergé dans ce contexte émotionnel fort. Cette absence d'impact de l'expressivité faciale sur les dimensions du sentiment de présence et sur celles de l'engagement utilisateur ne nous permet pas de valider les hypothèses H3 et H4.

Les résultats des dimensions évaluées de l'engagement et de la présence sociale sont élevés, notamment la notion de co-présence. Cela signifie que l'utilisateur accorde une importance notable à l'agent virtuel et à leurs échanges. D'ailleurs, il est intéressant de constater que quelques participants évoquent la patiente virtuelle comme étant une personne réelle, lui attribuant une personnalité, des comportements et des sentiments :

« Elle était un peu plus gênée lors de la situation 1, car elle ne me connaissait pas, j'imagine »

« Le comportement de la personne est différent, elle semble moins joyeuse que lors du premier entretien »

Suite à notre revue de littérature et aux résultats obtenus au sein de cette étude, nous avons souhaité analyser la présence de corrélations entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement. Concernant les dimensions de présence sociale, nos résultats indiquent qu'il existe des corrélations positives entre le sentiment de co-présence et la prise de perspective, ainsi qu'entre l'interdépendance émotionnelle perçue et la majorité des dimensions de l'empathie. À propos de l'engagement utilisateur, nous avons également observé des corrélations positives entre la notion d'esthétique et trois des dimensions de l'empathie (prise de perspective, simulation et réactivité proximale). Lorsque l'utilisateur apprécie l'environnement et la patiente au niveau visuel, cela impacte l'empathie de l'utilisateur. Ces résultats mettent en avant l'importance du travail esthétique pour l'induction d'empathie.

Pour conclure, nos résultats renforcent la possibilité d'un lien entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement. Prenant en compte l'ensemble des analyses de corrélations que nous avons observées, nous supposons que l'engagement et le sentiment de présence sociale impactent l'empathie.

4.5.4 Retour d'expérience sur les simulateurs en soins infirmiers

Les réponses au questionnaire post-expérimentation ont confirmé que l'ensemble des participants trouvent bénéfique l'utilisation des simulateurs pour la formation en soins infirmiers. De plus, ils ont rapporté que l'expressivité du patient virtuel était un élément important à intégrer au sein des simulateurs. D'ailleurs, plusieurs participants ont déclaré qu'ils auraient souhaité que les patientes virtuelles soient plus expressives :

« [...] L'expression de la patiente n'est pas suffisante à mon goût »

« Cela peut être enrichissant pour des personnes qui débutent dans le métier pour conceptualiser le soin de toilette et le premier contact avec un patient [...] mais il faut peut-être plus visualiser la patiente avec ses émotions »

« Je pense qu'il serait intéressant d'améliorer encore davantage les expressions faciales et corporelles, cela m'a manqué pour éprouver des émotions [...] »

« (Il faudrait) ajouter plus d'expressions visage, mimiques, gestuelles »

4.5.5 Limites de l'étude

Cette étude ne concerne que la prise en charge d'une patiente âgée, il serait pertinent de réitérer avec des agents masculins et d'âges divers afin de prendre en compte d'éventuelles différences de sexe et d'âge.

La limite principale concerne le fort contexte émotionnel de cette simulation, de part le scénario, les environnements, le réalisme visuel et comportemental des agents virtuels, les dialogues ou encore les interactions. Nous supposons que l'expressivité de l'agent virtuel est trop faible pour être notable par rapport à l'ensemble des facteurs sollicitant l'attention des utilisateurs au sein du simulateur. En effet, lorsque nous avons interrogé les participants sur une potentielle différence entre les patientes des deux situations au sein du questionnaire post-expérimentation, certains ont spécifié :

« Dans la première situation du simulateur, je lisais le dialogue et donc je n'étais pas porté sur les réactions de la patiente. »

« Je n'ai pas fait attention à ce détail, trop concentrée sur l'histoire en elle-même et le fait que ça soit peu connu comme méthode (l'utilisation d'un simulateur numérique). »

Face à ce contexte émotionnel et la sollicitation concernant leurs connaissances en soins infirmiers, l'impact de l'expressivité faciale sur l'empathie peut s'avérer limité pour les participants. Comme évoqué précédemment, des études complémentaires en intensifiant les expressions faciales, tout en évitant le phénomène de l'*uncanny valley* [Mori *et al.*, 1970], seraient bénéfiques pour mesurer l'impact de l'expressivité sur l'empathie.

Chapitre 5

Conclusion

Sommaire

5.1	Contextualisation des travaux	140
5.2	Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses	141
5.3	Contribution, apports théoriques et expérimentaux	144
5.4	Perspectives et travaux futurs	146

5.1 Contextualisation des travaux

L'objectif de ces travaux de thèse est d'approfondir notre connaissance concernant l'expressivité des agents virtuels ainsi que leur impact sur l'empathie de l'utilisateur. Cet objectif vient du constat de l'évolution de l'informatique graphique qui permet aujourd'hui de concevoir des agents virtuels réalistes que ce soit sur le plan visuel ou comportemental. L'expressivité des agents est également un enjeu important pour les interactions humain-machine. Toutefois, il est encore peu fréquent que les agents virtuels réalistes soient dotés d'expressions faciales émotionnelles, limitant leur expressivité et potentiellement leur possibilité d'induire des réactions émotionnelles et empathiques.

Appliquées dans le domaine de l'informatique, mais en se basant sur des théories provenant de la psychologie et des sciences cognitives, nos recherches abordent deux axes majeurs. Le premier axe de nos recherches porte sur la perception des expressions faciales émotionnelles des agents virtuels en comparaison à un humain réel. Nous investiguons également l'ajout de facteurs d'expressivité humaine pour faciliter la reconnaissance des émotions de base sur l'agent (Chapitre 3). Ce premier axe sur la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles est essentiel pour mener à bien les recherches de notre second axe de recherche qui propose l'investigation de l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur, notion centrale de nos travaux de recherche. Ce second axe de recherche inclut également l'investigation de l'impact de l'expressivité sur le sentiment de présence sociale et l'engagement (Chapitre 4).

Pour conclure les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse de doctorat, nous allons à présent répondre aux questions de recherche, dresser un bilan des contributions de nos investigations et enfin aborder les travaux futurs et les perspectives de ces travaux de recherche.

5.2 Réponses aux questions de recherche et discussion des hypothèses

Reconnaissance des expressions faciales émotionnelles

Le premier objectif de nos travaux de recherche était d'évaluer la reconnaissance des expressions faciales émotionnelles d'un agent virtuel, notamment en la comparant à celle d'un humain réel. Les travaux entrepris dans le cadre de cette expérimentation sont articulés autour de la question de recherche suivante :

Q1 : L'évolution des processus de conception des agents virtuels, comprenant l'amélioration du réalisme visuel et l'intégration de facteurs d'expressivité humaine, favorise-t-elle la reconnaissance des émotions ?

Afin de fournir des éléments de réponse à cette question de recherche, nous avons conçu un agent virtuel expressif puis nous avons mis en place une expérimentation visant à évaluer la reconnaissance des émotions de base (joie, colère, surprise, peur, dégoût et tristesse) d'humains virtuels ou réels via des vidéos.

Notre étude démontre un taux de reconnaissance élevé (supérieur à 80%) pour la plupart des émotions de base de manière analogue pour l'humain virtuel et l'humain réel. Seules la colère et la surprise sont moins bien reconnues sur l'humain virtuel que sur l'humain réel. Nos résultats démontrent que la retranscription des émotions en se basant sur le FACS et l'utilisation de techniques avancées telle que la photogrammétrie semblent tendre à une reconnaissance des émotions proche de celle d'un humain réel. Les confusions qui subsistent concernent les émotions négatives, notamment celles ayant des Unités d'Actions en commun. L'analyse des réponses au questionnaire post-expérimentation indique qu'en moyenne les participants déclarent être à l'aise face à l'agent virtuel.

Le deuxième aspect de cette problématique concerne l'intégration de facteurs d'expressivité humaine afin de faciliter la perception des émotions sur l'humain virtuel réaliste. Les facteurs d'expressivité intégrés sur l'agent virtuel sont les rides d'expression et la variation de la taille des pupilles en fonction de l'état émotionnel. En plus de la reconnaissance des émotions, le niveau de certitude de la réponse des participants ainsi que leur temps de réponse sont analysés. Les résultats démontrent que l'absence de variation de la taille des pupilles ne semble pas avoir d'impact sur la reconnaissance des émotions, alors que l'absence de rides d'expression impacte légèrement le niveau de certitude et le temps de réponse des participants

lors de la reconnaissance. Ces facteurs participent au réalisme de l'agent et peuvent s'avérer bénéfique pour la reconnaissance des émotions, notamment pour l'émotion de la colère.

Impact de l'expressivité faciale des agents sur l'empathie de l'utilisateur

Dans notre seconde expérimentation, nous avons investigué l'impact des agents virtuels possédant des expressions faciales émotionnelles sur l'empathie des utilisateurs. Les recherches entreprises dans cette étude portent sur la question de recherche suivante :

Q2.1 : Quel est l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur ?

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons mis en place une expérimentation afin d'évaluer l'impact de l'expressivité faciale d'un humain virtuel sur les réponses empathiques de l'utilisateur. L'expérimentation se base sur un simulateur en santé intégrant une patiente virtuelle, conçue avec un processus de conception avancée, permettant le réalisme et l'expressivité. Les participants de cette étude sont exclusivement des étudiants en Instituts de Formation en Soins Infirmiers. Cette étude a pour but d'analyser les bénéfices potentiels liés à l'expressivité d'un agent virtuel en terme d'induction d'empathie affective et cognitive.

Nos résultats démontrent une différence significative concernant la dimension de prise de perspective, composante de l'empathie cognitive qui se définit comme la tendance à se mettre spontanément à la place de la patiente, en faveur de l'agent virtuel réaliste et expressif, issu du processus de conception avancée, par rapport à l'agent virtuel réaliste sans expressions faciales, lors de la situation 1. Nous n'avons pas observé de différences lors de la situation 2 laissant supposer une influence du contexte sur l'empathie de l'utilisateur. Concernant les sous-catégories des composantes de l'empathie affective, nous n'observons pas de différences significatives en lien avec la variation de l'expressivité des agents virtuels.

À l'aide d'une caméra permettant la captation d'expressions faciales, nous avons analysé la présence de réactions émotionnelles de la part des utilisateurs lors de leurs échanges avec la patiente virtuelle. Bien que ces données ne nous permettent pas d'identifier une potentielle empathie affective, il est tout de même intéressant de noter que les participants ont eu des réactions émotionnelles au cours de cette simulation.

Indépendamment de l'expressivité des agents, le score d'empathie des participants est élevé lors de cette étude. Notre revue de littérature indique une influence potentielle de l'humeur et de l'âge des participants sur leurs réactions empathiques. Nous n'observons pas de corrélation entre l'empathie et l'affectivité positive et négative, toutefois nos résultats mettent

en exergue une corrélation négative concernant l'âge des participants et leur empathie, notamment les dimensions de contagion émotionnelle, de simulation et de réactivité proximale. Il semble que plus le participant est âgé, moins son score d'empathie est élevé.

Enfin, les scores moyens liés au sentiment de similarité et au lien affectif sont très élevés pour chacune des conditions. Ces constats semblent démontrer la possibilité pour un utilisateur d'éprouver un sentiment de similarité ainsi que de l'affection envers un agent virtuel, confirmant que les caractéristiques et la relation mise en place avec l'agent virtuel sont des éléments importants pour l'utilisateur.

Impact de l'expressivité faciale des agents sur le sentiment de présence sociale et l'engagement de l'utilisateur

Dans le but de contribuer à l'amélioration de l'expérience utilisateur, nous avons investigué l'impact de l'expressivité faciale des agents virtuels sur la présence sociale et l'engagement de l'utilisateur lors d'une simulation. Ainsi, notre dernière question de recherche s'articule autour de ces notions :

Q2.2 : L'expressivité faciale de l'agent virtuel impacte-t-elle l'engagement et le sentiment de présence sociale de l'utilisateur ?

Nous n'avons pas observé de différences significatives concernant l'impact de l'expressivité faciale de l'agent sur l'engagement et le sentiment de présence sociale de l'utilisateur. Néanmoins, les scores des dimensions d'engagement, l'esthétique et la satisfaction, et des dimensions de la présence sociale, la co-présence et l'interdépendance émotionnelle perçue, s'avèrent élevés, indépendamment de la modalité d'expressivité utilisée. Il est intéressant de noter que les résultats liés à la co-présence sont très élevés, l'utilisateur accorde une importance remarquable à l'agent. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'expressivité ne se limite pas aux expressions faciales émotionnelles. En effet, d'autres modalités expressives de l'agent virtuel, telles que les gestes, les dialogues ou encore le regard, ainsi que le contexte émotionnel fort émanant du simulateur dans sa globalité peuvent influencer les utilisateurs.

Enfin, nous avons souhaité analyser l'existence de potentielles corrélations entre les notions de présence sociale, d'engagement et d'empathie, comme évoqué au sein de notre revue de littérature. Considérées dans l'ensemble, nous observons des corrélations positives entre les dimensions de la présence sociale, de l'engagement et de l'empathie.

5.3 Contribution, apports théoriques et expérimentaux

L'apport principal de ces travaux de recherche provient de la conception et de l'évaluation d'agents virtuels possédant des expressions faciales émotionnelles, notamment pour accroître l'empathie de l'utilisateur.

En adéquation avec les évolutions de l'informatique graphique, nos travaux viennent alimenter les recommandations précédentes concernant la conception et la retranscription des émotions sur un agent virtuel. De plus, nos recherches ont contribué à étendre les connaissances concernant les interactions avec les agents, notamment sur la mise en place d'une situation empathique entre l'utilisateur et l'agent.

Tout d'abord, notre revue de littérature a permis d'identifier les différents facteurs facilitant la retranscription des émotions sur un agent et les caractéristiques favorisant l'apparition de réponses empathiques chez l'utilisateur. Notre première étude met en avant que le processus de conception d'humains virtuels, intégrant des techniques de photogrammétrie et la retranscription des émotions basée sur le FACS, permet un taux de reconnaissance des émotions élevé. Nos résultats permettent également d'identifier les premières potentialités liées à l'intégration de facteurs d'expressivité humaine sur le visage de l'agent. La présence des rides d'expressions ne favorisent pas la reconnaissance des émotions, toutefois leurs présences impactent le niveau de certitude et le temps de réponse des participants, notamment lors de la reconnaissance de la colère. Notre revue de littérature indique que l'amélioration du réalisme et de l'expressivité des agents virtuels est essentielle afin d'obtenir des interactions qualitatives. De fait, nous supposons que la combinaison de facteurs d'expressivité supplémentaires participerait au réalisme et à la perception des émotions.

Lors de notre seconde étude, nous avons mené des travaux sur l'impact des expressions faciales émotionnelles de l'agent et sur les réactions empathiques de l'utilisateur. Nous relevons une différence significative en faveur des agents virtuels dotés d'émotions concernant la prise de perspective, composante cognitive de l'empathie, de l'utilisateur. Il convient également de noter qu'indépendamment des modalités d'expressivité, le taux d'empathie des participants ainsi que le sentiment de similarité sont élevés. Les participants sont très impliqués émotionnellement lors de cette simulation. Toutefois, nos résultats révèlent une corrélation négative entre l'âge des participants et leur score d'empathie. Plus les participants sont âgés, moins leur score d'empathie est élevé. Enfin, la seconde phase de cette étude portait sur la présence sociale, plus précisément sur la co-présence et l'interdépendance émotionnelle perçue,

ainsi que sur l'engagement utilisateur, notamment les notions d'esthétique et de satisfaction. L'analyse des résultats de cette étude intégrant un agent virtuel, en matière d'empathie, de présence sociale, et d'engagement renforcent l'idée d'une corrélation positive entre ces notions, précédemment mentionnée dans notre revue de littérature.

Au cours de nos travaux de thèse, nous avons également rencontré diverses limites, que nous avons exposées au sein des discussions de nos études empiriques. Toutefois, nous souhaitons revenir sur les limites principales, car elles ont aussi vocation à être vues comme des préconisations pour la conception de futures études concernant l'expressivité des agents virtuels et les réactions empathiques des utilisateurs.

Lors de notre première expérimentation, nous avons utilisé des extraits issus d'une bibliothèque vidéo pour la reconnaissance des émotions sur un humain réel. Cependant ces émotions ne sont pas spontanées, cela peut induire des différences dans l'expression des émotions, notamment concernant les unités d'action, la durée ou encore l'exagération des expressions faciales émotionnelles. Il serait bénéfique d'effectuer une nouvelle étude avec des émotions spontanées et ne pas se limiter aux émotions de base. De plus, l'humain virtuel utilisé dans le cadre de notre étude n'est pas le double virtuel de l'humain réel, ce qui représente une limite pour l'analyse de la retranscription des émotions.

Enfin, au regard des contraintes auxquelles nous avons fait face, nous estimons que la diversification des agents virtuels selon l'âge, le genre et l'apparence serait bénéfique dans le cadre d'études sur l'expressivité et la modulation de l'empathie.

5.4 Perspectives et travaux futurs

Les travaux entrepris lors de cette thèse de doctorat ont permis une contribution aux recommandations liés à l'expressivité des agents virtuels et à la mise en place d'une situation empathique ; ils ont aussi permis une ouverture vers des perspectives de recherches.

Tout d'abord, le premier axe potentiel pour la poursuite des travaux serait l'étude de l'intensification des expressions faciales émotionnelles pour favoriser l'empathie de l'utilisateur. Dans la continuité de notre deuxième expérimentation et suite aux ressentis de certains utilisateurs concernant une expressivité trop faible des agents virtuels, nous souhaitons étudier la nécessité d'intensifier les émotions afin de faciliter leur perception par les utilisateurs. Nous nous interrogeons sur le fait qu'une émotion exprimée par un agent doit être sensiblement plus intense que celle exprimée par un humain dans le même contexte. Cela induirait potentiellement une plus forte empathie, notamment avec une contagion émotionnelle ou une imitation plus importante. Nous avons déjà débuté ces travaux, notamment avec la mise en place d'un protocole expérimental, la production d'un scénario, la création des interactions et la conception de nouvelles animations faciales nécessitant un temps de production important pour obtenir un rendu qualitatif.

De plus, il serait également profitable d'étudier chaque facteur, autre que ceux liés à l'expressivité de l'agent, impactant la mise en place de situations empathiques. Certains de ces facteurs, comme la similarité ou les différences culturelles, ont déjà fait l'objet d'études empiriques avec des agents virtuels réalistes, tels qu'évoqués dans notre revue de littérature. Toutefois, ce n'est pas le cas de tous les facteurs. D'autres facteurs, peu étudiés, seraient pourtant de nature à impacter l'empathie, comme par exemples les notions liées au contexte, le nombre d'agents présents dans la scène, l'interaction en langage naturel, l'influence du type d'émotions exprimées par l'agent virtuel, le comportement adaptatif de l'agent suivant les réactions empathiques de l'utilisateur ou encore les différences d'âge et d'apparence des agents virtuels.

Par ailleurs, concernant la conception d'agents virtuels expressifs, il serait avantageux que les agents intègrent d'autres facteurs d'expressivité afin d'évaluer leur impact sur la reconnaissance des émotions, et in fine, de prioriser et de qualifier leur apport dans le cadre de la conception d'agents virtuels réalistes.

Enfin, il serait intéressant d'investiguer plus précisément les liens entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement, afin de déterminer les influences et les implications potentielles entre ces notions.

Bibliographie

- 3D TOTAL PUBLISHING (2017). *The Artist's Guide to the Anatomy of the Human Head : Defining Structure and Capturing Emotions*. 3DTotal.com. xvii, 26
- ADAMO, N., DIB, H. N. et VILLANI, N. J. (2019). Animated Agents' Facial Emotions : Does the Agent Design Make a Difference ? *In Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics*, pages 10–25, Cham. Springer International Publishing. 41, 45
- AHN, S. J. et FOX, J. (2017). Immersive Virtual Environments, Avatars, and Agents for Health. *Oxford Research Encyclopedia of Communication*. 76
- ALEXANDER, O., ROGERS, M., LAMBETH, W., CHIANG, J.-Y., MA, W.-C., WANG, C.-C. et DEBEVEC, P. (2010). The digital emily project : Achieving a photorealistic digital actor. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30(4):20–31. 43
- ALGHOWINEM, S., ALSHEHRI, M., GOECKE, R. et WAGNER, M. (2014). Exploring Eye Activity as an Indication of Emotional States Using an Eye-Tracking Sensor. *Intelligent systems for science and information*, pages 261–276. 28
- AMBADAR, Z., SCHOOLER, J. W. et COHN, J. F. (2005). Deciphering the enigmatic face : The importance of facial dynamics in interpreting subtle facial expressions. *Psychological science*, 16(5):403–410. 41
- ANDRADE, A. D., BAGRI, A., ZAW, K., ROOS, B. A. et RUIZ, J. G. (2010). Avatar-mediated training in the delivery of bad news in a virtual world. *Journal of palliative medicine*, 13(12):1415–1419. 77
- ANDREA KLEINSMITH (2015). Understanding empathy training with virtual patients. *Computers in Human Behavior*, 4(1):139–148. 77
- AZIZ, M. et ABID, M. (2018). Social responsibility : As a predictor of altruistic personality among adults. *Psychology and Behavioral Science-international Journal*, 8(5):1–4. 18

- BAILENSON, J. N. et BLASCOVICH, J. (2004). Avatars. *In Encyclopedia of human-computer interaction, Berkshire Publishing Group*, pages 64–68. Citeseer. 34
- BAILENSON, J. N., YEE, N., PATEL, K. et BEALL, A. C. (2008). Detecting digital chameleons. *Computers in Human Behavior*, 24(1):66–87. 34, 59
- BAILLY, G. et PELACHAUD, C. (2009). Parole et expression des émotions sur le visage d’humanoïdes virtuels. *In Traité de la réalité virtuelle. Volume 5 : Les humains virtuels*, pages 187–208. Presses de l’Ecole des Mines de Paris. 27
- BÄNZIGER, T., GRANDJEAN, D., BERNARD, P.-J. J., KLASMEYER, G. et SCHERER, K. R. (2001). Prosodie de l’émotion : étude de l’encodage et du décodage. *Cahiers de linguistique française*, 23:11–37. 24
- BARON-COHEN, S. et WHEELWRIGHT, S. (2004). The empathy quotient : an investigation of adults with Asperger syndrome or high functioning autism, and normal sex differences. *Journal of autism and developmental disorders*, 34(2):163–175. 17, 31, 32, 61
- BATES, J. (1994). The role of emotion in believable agents. *Communications of the ACM, Special Issue on Agents*. 34, 35, 54
- BATSON, C. D. (2009). *These things called empathy : eight related but distinct phenomena*. MIT press. 14
- BAYLOR, A. L. et KIM, S. (2009). Designing nonverbal communication for pedagogical agents : When less is more. *Computers in Human Behavior*, 25(2):450–457. 76
- BAYLOR, A. L. et KIM, Y. (2004). Pedagogical agent design : The impact of agent realism, gender, ethnicity, and instructional role. *In International conference on intelligent tutoring systems*, pages 592–603. Springer. 54, 55
- BEALE, R. et CREED, C. (2009). Affective interaction : How emotional agents affect users. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(9):755–776. 44
- BECKER-ASANO, C. et WACHSMUTH, I. (2008). Affect simulation with primary and secondary emotions. *In International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 15–28. Springer. 42
- BEDNARSKI, R. et PSZCZOŁA, P. (2017). Comparison of face animation methods. *In Computer Game Innovations*, pages 29–40. Lodz University of Technology Press. 36, 37

- BEER, J. M., FISK, A. D. et ROGERS, W. A. (2009). Emotion recognition of virtual agents facial expressions : the effects of age and emotion intensity. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 53(2):131–135. 41, 61
- BELMAN, J. et FLANAGAN, M. (2010). Designing games to foster empathy. *International Journal of Cognitive Technology*, 15(1):11. 59
- BENSALAH, L., CAILLIES, S. et ANDUZE, M. (2016). Links Among Cognitive Empathy, Theory of Mind, and Affective Perspective Taking by Young Children. *The Journal of Genetic Psychology*, 177(1):17–31. 18
- BERTHOZ, A. et JORLAND, G. (2004). *Empathie (L')*. Odile Jacob. 13, 15, 19
- BESEL, L. D. S. et YUILLE, J. C. (2010). Individual differences in empathy : The role of facial expression recognition. *Personality and Individual Differences*, 49(2):107–112. 20, 85, 111
- BETTADAPURA, V. (2012). Face Expression Recognition and Analysis : The State of the Art. 36
- BEUN, R. J., de VOS, E. et WITTEMAN, C. (2003). Embodied Conversational Agents : Effects on Memory Performance and Anthropomorphisation. *In International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 315–319. 75
- BICKMORE, T. et CASSELL, J. (2001). Relational agents : a model and implementation of building user trust. *In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 396–403. ACM. 54, 76
- BICKMORE, T., SCHULMAN, D. et YIN, L. (2010). Maintaining engagement in long-term interventions with relational agents. *Applied Artificial Intelligence*, 24(6):648–666. 60
- BIOCCA, F. et HARMS, C. (2002). Defining and measuring social presence : Contribution to the networked minds theory and measure. *Proceedings of the Fifth Annual International Workshop on Presence*, pages 7–36. xviii, 72
- BIOCCA, F., HARMS, C. et GREGG, J. (2001). The networked minds measure of social presence : Pilot test of the factor structure and concurrent validity. *In 4th annual international workshop on presence, Philadelphia, PA*, pages 1–9. 120
- BIOCCA, F. et NOWAK, K. (2001). Plugging your body into the telecommunication system : Mediated embodiment, media interfaces, and social virtual environments. *Communication technology and society*, pages 407–447. 72

- BORISH, M., CORDAR, A., FOSTER, A., KIM, T., MURPHY, J. et LOK, B. (2014). Utilizing Real-time Human-Assisted Virtual Humans to Increase Real-world Interaction Empathy. *Kansei Engineering & Emotion Research (KEER)*, pages 441–455. 77
- BOUKRICH, H. (2008). A first approach for simulating affective theory of mind through mimicry and role-taking. *In The Third International Conference on Cognitive Science, Symposium : Emotional Computer Systems and Interfaces.* 42
- BOUKRICH, H. (2013). *Simulating empathy in virtual humans*. Thèse de doctorat, Bielefeld University. 58, 59, 63
- BOUKRICH, H., WACHSMUTH, I., CARMINATI, M. N. et KNOEFERLE, P. (2013). A computational model of empathy : Empirical evaluation. *In 2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 1–6. IEEE. 42
- BOUVIER, P. (2009). *La présence en réalité virtuelle, une approche centrée utilisateur*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est. 72
- BRADLEY, M. M., MICCOLI, L., ESCRIG, M. A. et LANG, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology*, 45(4):602–607. 28
- BROCKMYER, J. H., FOX, C. M., CURTISS, K. A., MCBROOM, E., BURKHART, K. M. et PIDRUZNY, J. N. (2009). The development of the Game Engagement Questionnaire : A measure of engagement in video game-playing. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4):624–634. 74
- CANI, M.-P., LARBOULETTE, C., MAGNENAT-THALMANN, N. et VOLINO, P. (2009). Les techniques d’habillage : peau, vêtements et chevelures. *Le traité de la réalité virtuelle*, page 26. 28
- CARUSO, D. R. et MAYER, J. D. (1998). A measure of emotional empathy for adolescents and adults. *Unpublished Manuscript*. 31
- CHATURVEDI, H. (2015). *Virtual humans and photorealism : The effect of photorealism of interactive virtual humans in clinical virtual environment on affective responses*. Thèse de doctorat, Clemson University. 44, 54
- CHATURVEDI, H., NEWSOME, N. D. et BABU, S. V. (2015). An evaluation of virtual human appearance fidelity on user’s positive and negative affect in human-virtual human interaction. *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pages 163–164. 54, 75

- CHRISTOPHE, V. (1998). *Les émotions : tour d'horizon des principales théories*, volume 3. Presses Univ. Septentrion. 21
- CONRAD, F. G., SCHOBER, M. F., JANS, M., ORLOWSKI, R. A., NIELSEN, D. et LEVENSTEIN, R. (2015). Comprehension and engagement in survey interviews with virtual agents. *Frontiers in Psychology*, 6:1578. 74
- CORDAR, A., BORISH, M., FOSTER, A. et LOK, B. (2014). Building virtual humans with back stories : training interpersonal communication skills in medical students. *In International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 144–153. Springer. 77
- COULSON, M. (2004). Attributing emotion to static body postures : Recognition accuracy, confusions, and viewpoint dependence. *Journal of nonverbal behavior*, 28(2):117–139. 41
- COULSON, M., BARNETT, J., FERGUSON, C. J. et GOULD, R. L. (2012). Real feelings for virtual people : Emotional attachments and interpersonal attraction in video games. *Psychology of Popular Media Culture*, 1(3):176. 54, 63
- COURGEON, M. (2011). *Marc : modèles informatiques des émotions et de leurs expressions faciales pour l'interaction Homme-machine affective temps réel*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud-Paris XI. xvii, 36, 39, 105
- COURGEON, M., BUISINE, S. et MARTIN, J.-C. (2009). Impact of expressive wrinkles on perception of a virtual character's facial expressions of emotions. *In 9th International Conference IVA, Netherlands*, pages 201–214. Springer. 38, 103, 104
- CRAIG, T. K. J., RUS-CALAFELL, M., WARD, T., LEFF, J. P., HUCKVALE, M., HOWARTH, E., EMSLEY, R. et GARETY, P. A. (2017). AVATAR therapy for auditory verbal hallucinations in people with psychosis : a single-blind, randomised controlled trial. *The Lancet Psychiatry*. 76
- CUFF, B. M. P., BROWN, S. J., TAYLOR, L. et HOWAT, D. J. (2016). Empathy : a review of the concept. *Emotion Review*, 8(2):144–153. 13
- DANFORTH, D. R., PROCTER, M., CHEN, R., JOHNSON, M. et HELLER, R. (2009). Development of virtual patient simulations for medical education. *Journal For Virtual Worlds Research*, 2(2). 77
- DARWIN, C. (1877). *L'expression des émotions chez l'homme et les animaux*. Rivages. 21

- DAVIS, M. H. (1983). Measuring individual differences in empathy : Evidence for a multidimensional approach. *Journal of personality and social psychology*, 44(1):113. 13, 31, 32, 116
- DAVIS, M. H. (1994). Empathy : A Social Psychological Approach. *Westview Press*. 17, 60, 61, 65
- DE MELO, C. et PAIVA, A. (2007). Expression of emotions in virtual humans using lights, shadows, composition and filters. *In International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 546–557. Springer. 40, 86
- DE MELO, C. M., CARNEVALE, P. et GRATCH, J. (2012). The effect of virtual agents' emotion displays and appraisals on people's decision making in negotiation. *In International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 53–66. Springer. 54
- DE MELO, C. M. et GRATCH, J. (2009). Creative expression of emotions in virtual humans. *In Proceedings of the 4th International Conference on Foundations of Digital Games*, pages 336–338. ACM. 48
- DE MELO, C. M. et GRATCH, J. (2009). Expression of emotions using wrinkles, blushing, sweating and tears. *In Proceedings of the International Conference IVA*, pages 188–200. 38, 39
- DE ROSIS, F., CAVALLUZZI, A., MAZZOTTA, I. et NOVIELLI, N. (2005). Can embodied conversational agents induce empathy in users? *Virtual Social Agents*, 65. 63, 68, 132
- DE SEVIN, E., NIEWIADOMSKI, R., BEVACQUA, E., PEZ, A.-M., MANCINI, M. et PELACHAUD, C. (2010). Greta, une plateforme d'agent conversationnel expressif et interactif. *Technique et Science Informatiques*, 29:751–776. 42
- DE VIGNEMONT, F. et SINGER, T. (2006). The empathic brain : how, when and why? *Trends in cognitive sciences*, 10(10):435–441. xxi, 5, 16, 17, 60, 61, 63, 64, 65, 116, 126, 132, 133
- DECETY, J. (2002). Naturaliser l'empathie. *L'encéphale*, 28(1):1–12. 13, 18
- DECETY, J. et JACKSON, P. L. (2006). A Social-Neuroscience Perspective on Empathy. *Psychological Science*, 15(2):54–58. 13
- DELADISMA, A. M., COHEN, M., STEVENS, A., WAGNER, P., LOK, B., BERNARD, T., OXENDINE, C., SCHUMACHER, L., JOHNSEN, K., DICKERSON, R., RAIJ, A., WELLS, R., DUERSON, M., HARPER, J. G. et LIND, D. S. (2007). Do medical students respond empathetically to a virtual patient? *American Journal of Surgery*, 193(6):756–760. 78, 132

- DEMOS, K. E., KELLEY, W. M., RYAN, S. L., DAVIS, F. C. et WHALEN, P. J. (2008). Human amygdala sensitivity to the pupil size of others. *Cerebral cortex*, 18(12):2729–2734. 28
- D'EON, E., LUEBKE, D. et ENDERTON, E. (2007). Efficient rendering of human skin. *In Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques*, pages 147–157. Eurographics Association. xvii, 46
- DIEMER, J., ALPERS, G. W., PEPERKORN, H. M., SHIBAN, Y. et MÜHLBERGER, A. (2015). The impact of perception and presence on emotional reactions : a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 6:26. 73
- DIMBERG, U., ANDRÉASSON, P. et THUNBERG, M. (2011). Emotional empathy and facial reactions to facial expressions. *Journal of Psychophysiology*. 20, 111, 134
- DIMBERG, U., THUNBERG, M. et ELMEHED, K. (2000). Unconscious Facial Reactions to Emotional Facial Expressions. *Psychological Science*, 11(1):86–89. 16, 20, 133
- DRIMALLA, H., LANDWEHR, N., HESS, U. et DZIOBEK, I. (2019). From face to face : the contribution of facial mimicry to cognitive and emotional empathy. *Cognition and Emotion*, pages 1–15. 20, 133
- DUNSWORTH, Q. et ATKINSON, R. K. (2007). Fostering multimedia learning of science : Exploring the role of an animated agent's image. *Computers & Education*, 49(3):677–690. 75
- DUPUY, L., MICOULAUD-FRANCHI, J.-A., CASSOUDESALLE, H., BALLOT, O., DEHAIL, P., AOUIZERATE, B., CUNY, E., de SEVIN, E. et PHILIP, P. (2020). Evaluation of a virtual agent to train medical students conducting psychiatric interviews for diagnosing major depressive disorders. *Journal of Affective Disorders*, 263:1–8. 77
- DUTREVE, L., MEYER, A. et BOUAKAZ, S. (2009). Real-time dynamic wrinkles of face for animated skinned mesh. *In International Symposium on Visual Computing*, pages 25–34. Springer. 39
- DYCK, M., WINBECK, M., LEIBERG, S., CHEN, Y., GUR, R. C. et MATHIAK, K. (2008). Recognition profile of emotions in natural and virtual faces. *PLoS One*, 3(11). 41, 103, 104
- EKMAN, P. (1993). Facial expression and emotion. *American psychologist*, 48(4):384. 24, 26
- EKMAN, P. (1999). Facial expressions. *Handbook of cognition and emotion*, 16:301–320. 25
- EKMAN, P. (2007). *Emotions revealed : Recognizing faces and feelings to improve communication and emotional life*, volume 12. Macmillan. 22, 25, 26, 35, 85, 86, 104, 120

- EKMAN, P. et FRIESEN, W. V. (1978). Manual for the facial action coding system. *Consulting Psychologists Press*. 7, 25, 37, 85, 86, 87, 105, 120, 181, 182
- EKMAN, P. et FRIESEN, W. V. (2003). *Unmasking the face : A guide to recognizing emotions from facial clues*. Ishk. xvii, 22, 26
- EKMAN, P. et ROSENBERG, E. L. (1997). *What the Face Reveals : Basic and Applied Studies of Spontaneous Expression Using the Facial Action Coding System (FACS)*. Series in affective science. Oxford University Press. 26
- ENNIS, C., HOYET, L., EGGES, A. et MCDONNELL, R. (2013). Emotion capture : Emotionally expressive characters for games. In *Proceedings of Motion on Games*, pages 53–60. ACM. 41, 62
- EYSENCK, S. B. G. et EYSENCK, H. J. (1978). Impulsiveness and venturesomeness : Their position in a dimensional system of personality description. *Psychological reports*, 43(3-suppl):1247–1255. 31, 32
- FABRI, M. et MOORE, D. (2005). The use of emotionally expressive avatars in collaborative virtual environments. *Virtual Social Agents*, 88(April):88–94. 35, 62, 74
- FAUCHON, C., FAILLENOT, I., QUESADA, C., MEUNIER, D., CHOUCOU, F., GARCIA-LARREA, L. et PEYRON, R. (2019). Brain activity sustaining the modulation of pain by empathetic comments. *Scientific reports*, 9(1):8398. 4, 78
- FAVRE, D., JOLY, J., REYNAUD, C. et SALVADOR, L. L. (2009). Empathie, contagion émotionnelle et coupure par rapport aux émotions : validation d’un test pour repérer et aider des élèves à risque. *Revue européenne de psychologie appliquée*, 59(3):211–227. 15
- FERSTL, Y., KOKKINARA, E. et MCDONNELL, R. (2016). Do I trust you, abstract creature ? : a study on personality perception of abstract virtual faces. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, pages 39–43. ACM. 43, 65
- FERSTL, Y. et MCDONNELL, R. (2018). A perceptual study on the manipulation of facial features for trait portrayal in virtual agents. In *Proceedings of the 18th International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 281–288. ACM. xvii, 44
- FLEMING, R., MOHLER, B. J., ROMERO, J., BLACK, M. J. et BREIDT, M. (2016). Appealing Female Avatars from 3D Body Scans : Perceptual Effects of Stylization. In *VISIGRAPP (1 : GRAPP)*, pages 335–345. xvii, 45, 46
- FRIJDA, N. H. (1986). *The emotions*. Cambridge University Press. 23

- FRITH, C. D. et FRITH, U. (1999). Interacting minds—a biological basis. *Science*, 286(5445): 1692–1695. 18
- FRITH, C. D. et FRITH, U. (2005). Theory of mind. *Current Biology*, 15(17):R644—R645. 18
- FUCHS, P., MOREAU, G. et DONIKIAN, S. (2009). Le traité de la réalité virtuelle Volume 5 : les humains virtuels. 34
- GAMAGE, V. et ENNIS, C. (2018). Examining the effects of a virtual character on learning and engagement in serious games. In *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Motion, Interaction, and Games*, page 20. ACM. 74, 75, 111
- GAMOND, L., GEORGE, N., LEMARÉCHAL, J.-D., HUGUEVILLE, L., ADAM, C. et TALLON-BAUDRY, C. (2011). Early influence of prior experience on face perception. *Neuroimage*, 54(2):1415–1426. 66
- GARAU, M. (2003). *The impact of avatar fidelity on social interaction in virtual environments*. Thèse de doctorat, University of London. 43, 44, 48
- GARAU, M., SLATER, M., VINAYAGAMOORTHY, V., BROGNI, A., STEED, A., SASSE, M. A., BEE, S. et SASSE, M. A. (2003). The impact of avatar realism and eye gaze control on perceived quality of communication in a shared immersive virtual environment. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '03(January):529–536. 40
- GESLIN, E. (2014). Validation of Avatars facial expressions of pain, based on the facial coding system (FACS). *SQRP*. 41
- GLAS, N. et PELACHAUD, C. (2015). Definitions of engagement in human-agent interaction. In *Proceedings of the Workshop on Engagement in Social Intelligent Virtual Agents.*, pages 33–40. 72, 73, 74
- GORISSE, G. (2019). *Impact du point de vue et de la fidélité des avatars sur les sentiments de présence et d’incarnation en environnement virtuel immersif*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers. 50
- GRATCH, J. et MARSELLA, S. (2001). Tears and fears : Modeling emotions and emotional behaviors in synthetic agents. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, pages 278–285. ACM. 76

- GUILLAIN, A. et PRY, R. (2012). D'un miroir l'autre. Fonction posturale et neurones miroirs. *Bulletin de psychologie*, 518(2):115–127. 18
- HALL, J. A. et MATSUMOTO, D. (2004). Gender differences in judgments of multiple emotions from facial expressions. *Emotion*, 4(2):201–206. 61
- HALL, L. (2005). Inflicting pain on synthetic characters : Moral concerns and empathic interaction. *Virtual Social Agents*, pages 144–149. 60, 67
- HALL, L., JONES, S. J., AYLETT, R., ANDRE, E., PAIVA, A., HOFSTEDÉ, G. J., KAPPAS, A., NAKANO, Y. et NISHIDA, T. (2011). Fostering empathic behaviour in children and young people : interaction with intelligent characters embodying culturally specific behaviour in virtual world simulations. *INTED2011 Proceedings*, pages 2804–2814. 70
- HALL, L., WOODS, S., AYLETT, R., NEWALL, L. et PAIVA, A. (2005a). Achieving empathic engagement through affective interaction with synthetic characters. *In International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction*, pages 731–738. Springer. 67, 73
- HALL, L., WOODS, S., AYLETT, R., NEWALL, L. et PAIVA, A. (2005b). Empathic interaction with synthetic characters : the importance of similarity. *Encyclopaedia of Human Computer Interaction*. xviii, 63, 65, 67, 120, 134
- HALL, L., WOODS, S., AYLETT, R. et PAIVA, A. (2006). Using theory of mind methods to investigate empathic engagement with synthetic characters. *International Journal of Humanoid Robotics*, 03(03):351–370. 59, 67, 74, 76, 111
- HALL, L., WOODS, S., DAUTENHAHN, K., SOBRAL, D., PAIVA, A., WOLKE, D. et NEWALL, L. (2004). Designing empathic agents : Adults versus kids. *In Intelligent tutoring systems*, pages 604–613. Springer. 61
- HARMS, C. et BIOCCA, F. (2004). Internal consistency and reliability of the networked minds measure of social presence. *Seventh Annual International Workshop : Presence*. 72, 117
- HARRISON, N. A., WILSON, C. E. et CRITCHLEY, H. D. (2007). Processing of observed pupil size modulates perception of sadness and predicts empathy. *Emotion*, 7(4):724. 28
- HARTMANN, T., TOZ, E. et BRANDON, M. (2010). Just a Game? Unjustified Virtual Violence Produces Guilt in Empathetic Players. *Media Psychology*, 13(4):339–363. 54
- HASLER, B. S., HIRSCHBERGER, G., SHANI-SHERMAN, T. et FRIEDMAN, D. A. (2014). Virtual peacemakers : Mimicry increases empathy in simulated contact with virtual outgroup

- members. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 17(12):766–771. xviii, 59, 69, 70
- HASLER, B. S., SPANLANG, B. et SLATER, M. (2017). Virtual race transformation reverses racial ingroup bias. *PLoS ONE*, 12(4):1–20. xviii, 59, 67
- HERBELIN, B. (2005). *Virtual reality exposure therapy for social phobia*. Thèse de doctorat, EPFL. 76
- HESS, E. H. (1975). The role of pupil size in communication. *Scientific American*, 233(5):110–119. 28, 85
- HESS, U. et FISCHER, A. (2014). Emotional mimicry : Why and when we mimic emotions. *Social and Personality Psychology Compass*, 8(2):45–57. 16
- HIGGINS, E. T. (1981). Role taking and social judgment : Alternative developmental perspectives and processes. *Social cognitive development : Frontiers and possible futures*, pages 119–153. 20
- HOFFMAN, M. L. (2001). *Empathy and moral development : Implications for caring and justice*. Cambridge University Press. 14, 19, 64
- HOGAN, R. (1969). Development of an empathy scale. *Journal of consulting and clinical psychology*, 33(3):307. 31, 32
- HOJAT, M., LOUIS, D., MAXWELL, K. et GONNELLA, J. S. (2011). The Jefferson Scale of Empathy (JSE) : An update. *Population Health Matters (Formerly Health Policy Newsletter)*, 24(2):5. 31
- HOJAT, M., MANGIONE, S., NASCA, T. J., COHEN, M. J. M., GONNELLA, J. S., ERDMANN, J. B., VELOSKI, J. et MAGEE, M. (2001). The Jefferson Scale of Physician Empathy : Development and Preliminary Psychometric Data. *Educational and Psychological Measurement*, 61(2):349–365. 31
- HOORN, J. F. et KONIJN, E. A. (2003). Perceiving and experiencing fictional characters : An integrative account. *Japanese Psychological Research*, 45(4):250–268. 50
- HYDE, J., CARTER, E. J., KIESLER, S. et HODGINS, J. K. (2013). Perceptual effects of damped and exaggerated facial motion in animated characters. *In 2013 10th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, pages 1–6. IEEE. 40

- HYDE, J., CARTER, E. J., KIESLER, S. et HODGINS, J. K. (2016). Evaluating animated characters : Facial motion magnitude influences personality perceptions. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 13(2):1–17. 48
- IACOBONI, M. (2009). Imitation, Empathy, and Mirror Neurons. *Annual Review of Psychology*, 60(1):653–670. 16
- ILGUNAITE, G., GIROMINI, L. et DI GIROLAMO, M. (2017). Measuring empathy : A literature review of available tools. *BPA Applied Psychology Bulletin*, 65:2–28. 30
- IZARD, C. E. (2007). Basic emotions, natural kinds, emotion schemas, and a new paradigm. *Perspectives on psychological science*, 2(3):260–280. 21
- JACK, R., BLAIS, C., SCHEEPERS, C., SCHYNS, P. et CALDARA, R. (2009). Cultural Confusions Show that Facial Expressions Are Not Universal. *Current biology : CB*, 19:1543–1548. 25
- JACKSON, P. L., MICHON, P.-E., GESLIN, E., CARIGNAN, M. et BEAUDOIN, D. (2015). EE-VEE : the Empathy-Enhancing Virtual Evolving Environment. *Frontiers in human neuroscience*. 41, 103
- JIMENEZ, J., SCULLY, T., BARBOSA, N., DONNER, C., ALVAREZ, X., VIEIRA, T., MATTS, P., ORVALHO, V., GUTIERREZ, D. et WEYRICH, T. (2010a). A practical appearance model for dynamic facial color. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(6):141. xvii, 39, 40
- JIMENEZ, J., WHELAN, D., SUNDSTEDT, V. et GUTIERREZ, D. (2010b). Real-time realistic skin translucency. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 30(4):32–41. xvii, 46, 47
- JOHNSEN, K., DICKERSON, R., RAJ, A., LOK, B., JACKSON, J., SHIN, M., HERNANDEZ, J., STEVENS, A. et LIND, D. S. (2005). Experiences in using immersive virtual characters to educate medical communication skills. *In Proceedings of the IEEE Virtual Reality. IEEE VR 2005*, pages 179–186. IEEE. 77, 78, 110
- JOLLIFFE, D. et FARRINGTON, D. P. (2006). Development and validation of the Basic Empathy Scale. *Journal of adolescence*, 29(4):589–611. 31
- JOSPE, K., FLÖEL, A. et LAVIDOR, M. (2018). The interaction between embodiment and empathy in facial expression recognition. *Social cognitive and affective neuroscience*, 13(2):203–215. 20, 133
- JOUBERT, A. (2014). *Étude qualitative des déterminants de l'empathie chez les internes en médecine générale*. Thèse de doctorat, Université Paris Descartes. 132

- KASPERSSON, M. (2015). *Facial Realism through Wrinkle Maps*. Thèse de doctorat, Faculty of Computing at Blekinge Institute of Technology. 39
- KÄTSYRI, J. et SAMS, M. (2008). The effect of dynamics on identifying basic emotions from synthetic and natural faces. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(4):233–242. 41, 86, 103
- KENNY, P., PARSONS, T., GRATCH, J. et RIZZO, A. (2008). Virtual humans for assisted health care. In *Proceedings of the 1st international conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, page 6. ACM. 76
- KENNY, P., PARSONS, T. D., GRATCH, J., LEUSKI, A. et RIZZO, A. (2007). Virtual patients for clinical therapist skills training. In *Proceedings of the International Conference IVA*, pages 197–210. Springer. 77
- KHAN, R., MEYER, A., KONIK, H. et BOUAKAZ, S. (2012). Une méthode de reconnaissance des expressions du visage basée sur la perception. In *RFIA 2012 - Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, pages 972–978. xxi, 27
- KLINGER, E. et VIAUD-DELMON, I. (2009). L’humain virtuel en neurosciences cliniques. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9):1689–1699. 34
- KLOOSTERMAN, N. A., MEINDERTSMA, T., LOON, A. M., LAMME, V. A. F., BONNEH, Y. S. et DONNER, T. H. (2015). Pupil size tracks perceptual content and surprise. *European Journal of Neuroscience*, 41(8):1068–1078. 28
- KRET, M. et DE DREU, C. (2019). The Power of Pupil Size in Establishing Trust and Reciprocity. *Journal of Experimental Psychology : General*, 148. 105
- KRET, M. E. (2018). The role of pupil size in communication. Is there room for learning? *Cognition and Emotion*, 32(5):1139–1145. 28
- KRON, F. W., FETTERS, M. D., SCERBO, M. W., WHITE, C. B., LYPSON, M. L., PADILLA, M. A., GLIVA-McCONVEY, G. A., BELFORE, L. A., WEST, T., WALLACE, A. M., OTHERS, GUETTERMAN, T. C., SCHLEICHER, L. S., KENNEDY, R. A., MANGRULKAR, R. S., CLEARY, J. F., MARSELLA, S. C. et BECKER, D. M. (2017). Using a computer simulation for teaching communication skills : A blinded multisite mixed methods randomized controlled trial. *Patient education and counseling*, 100(4):748–759. 77
- KRUMHUBER, E., SKORA, L., KÜSTER, D. et FOU, L. (2016). A Review of Dynamic Datasets for Facial Expression Research. *Emotion Review*, 9. 89

- LALLEMAND, C. et GRONIER, G. (2015). *Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles. 29
- LANCELOT, A., COSTANTINI-TRAMONI, M.-L., TARQUINIO, C. et MARTINET, Y. (2009). Première étape de l'élaboration d'une échelle d'empathie perçue. *Les cahiers internationaux de psychologie sociale*, Numéro 82(2):25. 4
- LARBOULETTE, C. et CANI, M.-P. (2004). Real-time dynamic wrinkles. *In Computer Graphics International, 2004. Proceedings*, pages 522–525. IEEE. 28, 39
- LAZARUS, R. S. et FOLKMAN, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer publishing company. 23
- LEE, D. H. et ANDERSON, A. K. (2017). Reading What the Mind Thinks From How the Eye Sees. *Psychological Science*, 28(4):494–503. 28
- LEE, K. K. et XU, Y. (2003). Real-time estimation of facial expression intensity. *In 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 2567–2572. 40
- LELARD, T. (2017). Influence du contexte émotionnel sur le contrôle postural. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 47(3):208. 24
- LEMOINE, J.-F. et CHERIF, E. (2012). Comment générer de la confiance envers un agent virtuel à l'aide de ses caractéristiques? Une étude exploratoire. *Management & Avenir*, 1(8):169–188. 54
- LENNON, R. et EISENBERG, N. (1987). Gender and age differences in empathy and sympathy. *Empathy and its development*, pages 195–217. 17, 61, 132
- LESTER, J. C., CONVERSE, S. A., KAHLER, S. E., BARLOW, S. T., STONE, B. A. et BHOGAL, R. S. (1997). The persona effect : affective impact of animated pedagogical agents. *In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pages 359–366. ACM. 75
- LEUCHS, L., SCHNEIDER, M., CZISCH, M. et SPOORMAKER, V. I. (2017). Neural correlates of pupil dilation during human fear learning. *NeuroImage*, 147:186–197. 28
- LHOMMET, M. (2012). *Replicants : humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux : de l'empathie cognitive à l'empathie affective*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne. 34

- LI, Z., MAO, X. et LIU, L. (2009). Providing expressive eye movement to virtual agents. *Proceedings of the international conference on Multimodal interfaces - ICMI*, page 241. 40
- LIANG, Y.-s., YANG, H.-x., MA, Y.-t., LUI, S. S. Y., CHEUNG, E. F. C., WANG, Y. et CHAN, R. C. K. (2019). Validation and extension of the questionnaire of cognitive and affective empathy in the Chinese setting. *PsyCh journal*, 8(4):439–448. 32
- LIKERT, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of psychology*. 92
- LUCAS, G. M., GRATCH, J., KING, A. et MORENCY, L.-P. (2014). It's only a computer : Virtual humans increase willingness to disclose. *Computers in Human Behavior*, 37:94–100. 76
- LUO, P., NG-THOW-HING, V. et NEFF, M. (2013). An examination of whether people prefer agents whose gestures mimic their own. *In International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 229–238. Springer. 59
- MACDONALD, A. (2003). I feel your pain (and joy) : New theories about empathy. *Brain Work*, 13(4):1–3. 16, 20
- MACDORMAN, K. F., GREEN, R. D., HO, C.-C. et KOCH, C. T. (2009). Too real for comfort ? Uncanny responses to computer generated faces. *Computers in human behavior*, 25(3):695–710. 43
- MÄKÄRÄINEN, M., KÄTSYRI, J. et TAKALA, T. (2014). Exaggerating facial expressions : A way to intensify emotion or a way to the uncanny valley ? *Cognitive Computation*, 6(4):708–721. 40, 134
- MALDONADO, H. et HAYES-ROTH, B. (2004). Toward cross-cultural believability in character design. *Agent Culture : Human-Agent Interaction in a Multicultural World*, pages 143–175. 65, 66
- MARSELLA, S., GRATCH, J., PETTA, P. et OTHERS (2010). Computational models of emotion. *A Blueprint for Affective Computing-A Sourcebook and Manual*, 3(January 2010):1598–1602. 42
- MARSELLA, S., JOHNSON, W. L. et LABORE, C. (2000). Interactive pedagogical drama. *In Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*, pages 301–308. ACM. 67

- MASCARENHAS, S., PRADA, R., PAIVA, A. et HOFSTEDE, G. J. (2013). Social importance dynamics : A model for culturally-adaptive agents. *In International Workshop on Intelligent Virtual Agents*, pages 325–338. Springer. 70
- MATSUMOTO, D., YOO, S. H. et NAKAGAWA, S. (2008). Culture, emotion regulation, and adjustment. *Journal of personality and social psychology*, 94(6):925. 61
- MAUSS, I. B. et ROBINSON, M. D. (2009). Measures of emotion : A review. *Cognition and emotion*, 23(2):209–237. 29
- MCDONNELL, R., BREIDT, M. et BÜLTHOFF, H. H. (2012). Render me Real ? Investigating the Effect of Render Style on the Perception of Animated Virtual Humans. *ACM Transactions on Graphics*, 31(4):1–11. xvii, 44, 45, 48
- MCDUFF, D., MAHMOUD, A., MAVADATI, M., AMR, M., TURCOT, J. et el KALIOUBY, R. (2016). AFFDEX SDK : a cross-platform real-time multi-face expression recognition toolkit. *In Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 3723–3726. ACM. 114
- MCQUIGGAN, S. W., ROWE, J. P. et LESTER, J. C. (2008). The effects of empathetic virtual characters on presence in narrative-centered learning environments. *In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1511–1520. ACM. 73, 74
- MEHRABIAN, A. (1969). Significance of posture and position in the communication of attitude and status relationships. *Psychological Bulletin*, 71(5):359. 24
- MEHRABIAN, A. et EPSTEIN, N. (1972). A measure of emotional empathy. *Journal of personality*, 40(4):525–543. 14, 31
- MELCHERS, M. C., LI, M., HAAS, B. W., REUTER, M., BISCHOFF, L. et MONTAG, C. (2016). Similar personality patterns are associated with empathy in four different countries. *Frontiers in psychology*, 7:290. 64
- MELGARE, J. K., MUSSE, S. R., SCHNEIDER, N. R. et QUEIROZ, R. B. (2019). Investigating Emotion Style in Human Faces and Avatars. *In 18th Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment (SBGames)*, pages 115–124. IEEE. 40
- MELTZOFF, A. N. et DECETY, J. (2003). What imitation tells us about social cognition : a rapprochement between developmental psychology and cognitive neuroscience. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 358(1431):491–500. 16

- MERCER, S. W., MAXWELL, M., HEANEY, D. et WATT, G. C. M. (2004). The consultation and relational empathy (CARE) measure : development and preliminary validation and reliability of an empathy-based consultation process measure. *Family Practice*, 21(6):699–705. 31
- MITCHELL, W. J., SZERSZEN SR, K. A., LU, A. S., SCHERMERHORN, P. W., SCHEUTZ, M. et MACDORMAN, K. F. (2011). A mismatch in the human realism of face and voice produces an uncanny valley. *i-Perception*, 2(1):10–12. 49
- MOORE, D., CHENG, Y., MCGRATH, P. et POWELL, N. J. (2005). Collaborative virtual environment technology for people with autism. *Focus on autism and other developmental disabilities*, 20(4):231–243. 76
- MORI, M., MACDORMAN, K. F. et KAGEKI, N. (2012). The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2):98–100. xviii, 51, 52
- MORI, M., MACDORMAN, K. F. t. et MINATO, T. t. (1970). The Uncanny Valley. *Energy*, 7(4):33–35. xviii, 51, 52, 101, 137
- MYSZKOWSKI, N., BRUNET-GOUET, E., ROUX, P., ROBIEUX, L., MALÉZIEUX, A., BOUJUT, E. et ZENASNI, F. (2017). Is the Questionnaire of Cognitive and Affective Empathy measuring two or five dimensions? Evidence in a French sample. *Psychiatry research*, 255:292–296. 32
- NARME, P., MOURAS, H., LOAS, G., KRYSZKOWIAK, P., ROUSSEL, M., BOUCART, M. et GODEFROY, O. (2010). Vers une approche neuropsychologique de l'empathie. *Revue de neuropsychologie*, 2(4):292–298. 14, 15, 18
- NEUMANN, D. L., CHAN, R. C. K., BOYLE, G. J., WANG, Y. et WESTBURY, H. R. (2015). Measures of empathy : Self-report, behavioral, and neuroscientific approaches. *In Measures of personality and social psychological constructs*, pages 257–289. Elsevier. 30, 134
- NEUMANN, D. L. et WESTBURY, H. R. (2011). The psychophysiological measurement of empathy. *Psychology of empathy*, pages 119–142. 29, 30, 33, 111, 134
- NGOYI, L., MPANGA, S., NGOYI, A., SUDHIR, V., MURTHY, A., RANI, D. et VIKRAM, P. (2014). The relationship between student engagement and social presence in online learning. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*, 3(4):242–247. 74
- NICOVICH, S. G., BOLLER, G. W. et CORNWELL, T. B. (2005). Experienced presence within computer-mediated communications : Initial explorations on the effects of gender with

- respect to empathy and immersion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 10(2): JCMC1023. 73
- NIEWIADOMSKI, R., BEVACQUA, E., MANCINI, M. et PELACHAUD, C. (2009). Greta : an interactive expressive eca system. *In Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, pages 1399–1400. 42
- NIEWIADOMSKI, R., DEMEURE, V. et PELACHAUD, C. (2010). Warmth, competence, believability and virtual agents. *In International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 272–285. Springer. Berlin, Heidelberg. 34
- NOËL, A., GUILLAUME, C. et HOU, C. (2016). Influence de l’expression faciale, de la prosodie et du contexte dans l’identification des émotions chez le sujet âgé. *Bulletin de psychologie*, 542(2):127–136. 24
- NOWAK, K. L. et BIOCCHA, F. (2003). The Effect of the Agency and Anthropomorphism on Users’ Sense of Telepresence, Copresence, and Social Presence in Virtual Environments. *Presence*, 12(5):481–494. 73, 74, 135
- NUNNARI, F. et HELOIR, A. (2017). Generation of Virtual Characters from Personality Traits. *In International Conference on Intelligent Virtual Agents*, pages 301–314. Springer. 44
- OAT, C. (2007). Animated Wrinkle Maps. *In ACM SIGGRAPH 2007 Courses*, pages 33–37. ACM. 38, 39
- O’BRIEN, H. L., CAIRNS, P. et HALL, M. (2018). A practical approach to measuring user engagement with the refined user engagement scale (UES) and new UES short form. *International Journal of Human-Computer Studies*, 112:28–39. 73, 117, 120
- O’BRIEN, H. L. et TOMS, E. G. (2008). What is user engagement? A conceptual framework for defining user engagement with technology. *Journal of the American society for Information Science and Technology*, 59(6):938–955. 73
- OCHS, M. (2007). *Modélisation, formalisation et mise en œuvre d’un agent rationnel dialogant émotionnel empathique*. Thèse de doctorat, Paris 8. 3
- OCHS, M. et BLACHE, P. (2016). Virtual Reality for Training Doctors to Break Bad News. *In European Conference on Technology Enhanced Learning*, pages 466–471. Springer. 77
- OCHS, M., NIEWIADOMSKI, R. et PELACHAUD, C. (2015). Facial Expressions of Emotions for Virtual Characters. *The Oxford Handbook of Affective Computing*, page 261. 35

- OCHS, M., SADEK, D. et PELACHAUD, C. (2012). A formal model of emotions for an empathic rational dialog agent. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 24(3):410–440. 57
- OMDAHL, B. L. (1995). *Cognitive appraisal, emotion, and empathy*. Lawrence Erlbaum Associates. 13, 18
- ORTONY, A., CLORE, G. L. et COLLINS, A. (1988). The cognitive structure of emotions. *Cambridge Uni.* 17, 23
- PACHERIE, E. (2004). L'empathie et ses degrés. In *L'empathie*, pages 149–181. Editions Odile Jacob. 14, 15, 25
- PAIVA, A. (2011). Empathy in Social Agents. *International Journal of Virtual Reality*, 10(1):1–4. 56
- PAIVA, A., DIAS, J., SOBRAL, D., AYLETT, R., WOODS, S., HALL, L. et ZOLL, C. (2005). Learning by feeling : Evoking empathy with synthetic characters. *Applied Artificial Intelligence*, 19(3-4):235–266. 65, 132
- PAIVA, A., DIAS, J., SOBRAL, D., WOODS, S. et HALL, L. (2004). Building empathic lifelike characters : the proximity factor. In *Workshop on Empathic Agents, AAMAS*, volume 4. 59, 65
- PAIVA, A., LEITE, I., BOUKRICHA, H. et WACHSMUTH, I. (2017). Empathy in Virtual Agents and Robots : A Survey. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 7(3):11. xviii, 5, 15, 18, 56, 57, 59, 61, 62, 63, 65, 111, 116, 119, 126, 132, 133
- PALLOT, M., EYNARD, R., POUSSARD, B., CHRISTMANN, O. et RICHIR, S. (2013). Augmented sport : exploring collective user experience. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference : Laval Virtual*, page 4. ACM. 71
- PANDZIC, I. S. et FORCHHEIMER, R. (2002). The Origins of the MPEG-4 Facial Animation Standard. *MPEG-4 Facial Animation : The Standard, Implementation And Applications*, pages 3–13. 36
- PANTIC, M., VALSTAR, M., RADEMAKER, R. et MAAT, L. (2005). Web-based database for facial expression analysis. In *2005 IEEE international conference on multimedia and Expo*, page 5. IEEE. 89
- PARKE, F. I. (1982). Parameterized models for facial animation. *IEEE computer graphics and applications*, 2(9):61–68. 36

- PARTALA, T. et SURAKKA, V. (2003). Pupil size variation as an indication of affective processing. *International journal of human-computer studies*, 59(1-2):185–198. 28, 40
- PELACHAUD, C. (2009). Modelling multimodal expression of emotion in a virtual agent. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 364(1535):3539–3548. 35
- PERRINET, J. (2013). *Évaluation de l'impact des facteurs émotionnels lors d'interactions physiques entre humains réels et virtuels*. Thèse de doctorat, Université Rennes 1. 41
- PERRON, B. (2005). Jeu vidéo et émotions. *Le game design de jeux vidéo. Approches de l'expression vidéo-ludique, Éditions Mnémos*. 2
- PHILIP, L., MARTIN, J.-C. et CLAVEL, C. (2017). Suppression of facial mimicry of negative facial expressions in an incongruent context. *Journal of Psychophysiology*. 62
- PHILIP, L., MARTIN, J.-C. et CLAVEL, C. (2018). Rapid Facial Reactions in Response to Facial Expressions of Emotion Displayed by Real Versus Virtual Faces. *i-Perception*, 9(4):1–18. 62, 86, 134
- PHILIP, P., DUPUY, L., AURIACOMBE, M., SERRE, F., DE SEVIN, E., SAUTERAUD, A. et MICOULAUD-FRANCHI, J.-A. (2020). Trust and acceptance of a virtual psychiatric interview between embodied conversational agents and outpatients. *npj Digital Medicine*, 3(1):1–7. 76
- PHILIPPOT, P., CHAPELLE, G. et BLAIRY, S. (2002). Respiratory feedback in the generation of emotion. *Cognition & Emotion*, 16(5):605–627. 24
- PICARD, R. W. (1995). Affective computing. *M.I.T Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report*, 321. 2
- PICARD, R. W. (2003). Affective computing : Challenges. *International Journal of Human Computer Studies*, 59(1-2):55–64. 2
- PICARD, R. W., VYZAS, E. et HEALEY, J. (2001). Toward machine emotional intelligence : Analysis of affective physiological state. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 23(10):1175–1191. 29
- PLUTCHIK, R. (2001). The Nature of Emotions Human emotions have deep evolutionary roots, a fact that may explain their complexity and provide tools for clinical practice. *American scientist*, 89(4):344–350. 22

- POLLICK, F. E., HILL, H., CALDER, A. et PATERSON, H. (2003). Recognising facial expression from spatially and temporally modified movements. *Perception*, 32(7):813–826. 40
- PRENDINGER, H., MORI, J. et ISHIZUKA, M. (2005). Using human physiology to evaluate subtle expressivity of a virtual quizmaster in a mathematical game. *International Journal of Human-Computer Studies*, 62(2):231–245. 76
- QIU, L. et BENBASAT, I. (2009). Evaluating anthropomorphic product recommendation agents : A social relationship perspective to designing information systems. *Journal of management information systems*, 25(4):145–182. 54, 73
- QUEIRÓS, A., FERNANDES, E., RENIERS, R., SAMPAIO, A., COUTINHO, J. et SEARACARDOSO, A. (2018). Psychometric properties of the questionnaire of cognitive and affective empathy in a Portuguese sample. *PloS one*, 13(6). 32
- RAITURKAR, P., FARID, H. et JAIN, E. (2018). Identifying computer-generated portraits : an eye tracking study. Rapport technique, University of Florida. 44
- RAVAJA, N., BENTE, G., KÄTSYRI, J., SALMINEN, M. et TAKALA, T. (2016). Virtual character facial expressions influence human brain and facial EMG activity in a decision-making game. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 9(2):285–298. 62, 134
- REEVES, B. et NASS, C. (1996). *How people treat computers, television, and new media like real people and places*. CSLI Publications and Cambridge university press. 34
- RENIERS, R. L., CORCORAN, R., DRAKE, R., SHRYANE, N. M. et VÖLLM, B. A. (2011). The QCAE : A questionnaire of cognitive and affective empathy. *Journal of personality assessment*, 93(1):84–95. xv, 18, 31, 32, 33, 111, 116, 117, 119, 125, 126, 194
- RIEK, L. D., RABINOWITZ, T.-C., CHAKRABARTI, B. et ROBINSON, P. (2009). How anthropomorphism affects empathy toward robots. *In Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pages 245–246. ACM. 43
- RIESS, H. et KRAFT-TODD, G. (2014). EMPATHY : a tool to enhance nonverbal communication between clinicians and their patients. *Academic Medicine*, 89(8):1108–1112. 77
- RIVA, G., MANTOVANI, F., CAPIDEVILLE, C. S., PREZIOSA, A., MORGANTI, F., VILLANI, D., GAGGIOLI, A., BOTELLA, C. et ALCAÑIZ, M. (2007). Affective interactions using virtual reality : the link between presence and emotions. *CyberPsychology & Behavior*, 10(1):45–56. 73

- RIZZO, A., KENNY, P. et PARSONS, T. D. (2011). Intelligent virtual patients for training clinical skills. *JVRB-Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 8(3). 76
- RIZZOLATTI, G. et SINIGAGLIA, C. (2008). *Neurones miroirs*, volume 29. Odile Jacob. 16
- ROBB, A., KOPPER, R., AMBANI, R., QAYYUM, F., LIND, D., SU, L.-M. et LOK, B. (2013). Leveraging virtual humans to effectively prepare learners for stressful interpersonal experiences. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(4):662–670. 77
- RODRIGUES, S. H., MASCARENHAS, S., DIAS, J. et PAIVA, A. (2009). “I can feel it too!” : Emergent empathic reactions between synthetic characters. In *2009 3rd International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops*, pages 1–7. IEEE. xviii, 57, 58
- RODRIGUES, S. H., MASCARENHAS, S., DIAS, J. et PAIVA, A. (2015). A process model of empathy for virtual agents. *Interacting with Computers*, 27(4):371–391. xviii, 57, 58, 64
- ROETHER, C. L., OMLOR, L., CHRISTENSEN, A. et GIESE, M. A. (2009). Critical features for the perception of emotion from gait. *Journal of vision*, 9(6):15. 24
- ROGERS, C. R. (1959). *A theory of therapy, personality, and interpersonal relationships : As developed in the client-centered framework*, volume 3. McGraw-Hill New York. 18
- ROGERS, C. R. (1975). Empathic : An unappreciated way of being. *The counseling psychologist*, 5(2):2–10. 18
- ROVIRA, A., SWAPP, D., SPANLANG, B. et SLATER, M. (2009). The use of virtual reality in the study of people’s responses to violent incidents. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 3:59. 54
- RUHLAND, K., PETERS, C. E., ANDRIST, S., BADLER, J. B., BADLER, N. I., GLEICHER, M., MUTLU, B. et MCDONNELL, R. (2015a). A Review of Eye Gaze in Virtual Agents, Social Robotics and HCI : Behaviour Generation, User Interaction and Perception. *Computer Graphics Forum*, 34(6):299–326. 40
- RUHLAND, K., ZIBREK, K. et MCDONNELL, R. (2015b). Perception of personality through eye gaze of realistic and cartoon models. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, pages 19–23. ACM. 49
- RYMARCZYK, K., ŻURAWSKI, Ł., JANKOWIAK-SIUDA, K. et SZATKOWSKA, I. (2016). Emotional empathy and facial mimicry for static and dynamic facial expressions of fear and disgust. *Frontiers in psychology*, 7:1853. 16

- SAGI, A. et HOFFMAN, M. L. (1976). Empathic distress in the newborn. *Developmental Psychology*, 12(2):175. 16
- SCHERER, K. R. (2003). Vocal communication of emotion : A review of research paradigms. *Speech communication*, 40(1):227–256. 24
- SCHERER, K. R., SCHORR, A. et JOHNSTONE, T. (2001). *Appraisal processes in emotion : Theory, methods, research*. Oxford University Press. 23
- SCHRAMMEL, F., PANNASCH, S., GRAUPNER, S.-T., MOJZISCH, A. et VELICHKOVSKY, B. M. (2009). Virtual friend or threat? The effects of facial expression and gaze interaction on psychophysiological responses and emotional experience. *Psychophysiology*, 46(5):922–931. 54, 134
- SCHWIND, V. et JÄGER, S. (2016). The Uncanny Valley and the Importance of Eye Contact. *i-com*, 15(1):93–104. 44
- SCHWIND, V., WOLF, K. et HENZE, N. (2018). Avoiding the Uncanny Valley in Virtual Character Design. *Interactions*, 25(5):45–49. 52
- SEINFELD, S., ARROYO-PALACIOS, J., IRURETAGOYENA, G., HORTENSIUS, R., ZAPATA, L. E., BORLAND, D., de GELDER, B., SLATER, M. et SANCHEZ-VIVES, M. V. (2018). Offenders become the victim in virtual reality : impact of changing perspective in domestic violence. *Scientific reports*, 8(1):2692. xviii, 68, 69
- SEYAMA, J. et NAGAYAMA, R. S. (2007). The uncanny valley : Effect of realism on the impression of artificial human faces. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 16(4):337–351. 43
- SHIN, D. (2018). Empathy and embodied experience in virtual environment : To what extent can virtual reality stimulate empathy and embodied experience? *Computers in Human Behavior*, 78:64–73. 73
- SIDDIQUE, F. B., KAMPMAN, O., YANG, Y., DEY, A. et FUNG, P. (2017). Zara Returns : Improved Personality Induction and Adaptation by an Empathetic Virtual Agent. *Proceedings of ACL 2017, System Demonstrations*, pages 121–126. 63
- SIDNER, C. L., KIDD, C. D., LEE, C. et LESH, N. (2004). Where to look : a study of human-robot engagement. *In Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces*, pages 78–84. ACM. 72

- SIFAKIS, E., SELLE, A., ROBINSON-MOSHER, A. et FEDKIW, R. (2006). Simulating speech with a physics-based facial muscle model. *In Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 261–270. 37
- SINGER, T., SEYMOUR, B., O'DOHERTY, J., KAUBE, H., DOLAN, R. J. et FRITH, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, 303(5661):1157–1162. 16
- SIROIS, S. et BRISSON, J. (2014). Pupillometry. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Cognitive Science*, 5(6):679–692. 28
- SLATER, M., ANTLEY, A., DAVISON, A., SWAPP, D., GUGER, C., BARKER, C., PISTRANG, N. et SANCHEZ-VIVES, M. V. (2006). A virtual reprise of the Stanley Milgram obedience experiments. *PloS one*, 1(1):e39. 54
- SLATER, M., ROVIRA, A., SOUTHERN, R., SWAPP, D., ZHANG, J. J., CAMPBELL, C. et LEVINE, M. (2013). Bystander responses to a violent incident in an immersive virtual environment. *PloS one*, 8(1):e52766. xviii, 67, 68
- SLATER, M., USOH, M. et STEED, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2):130–144. 72
- SPRENG, R. N., MCKINNON, M. C., MAR, R. A. et LEVINE, B. (2009). The Toronto Empathy Questionnaire : Scale development and initial validation of a factor-analytic solution to multiple empathy measures. *Journal of personality assessment*, 91(1):62–71. 31
- STEPPER, S. et STRACK, F. (1993). Proprioceptive determinants of emotional and nonemotional feelings. *Journal of Personality and Social Psychology*, 64(2):211. 24
- STEVENS, C., PINCHBECK, B., LEWIS, T., LUERSEN, M., PFITZNER, D., POWERS, D., ABRAHAMIAN, A., LEUNG, Y. et GIBERT, G. (2016). Mimicry and expressiveness of an ECA in human-agent interaction : familiarity breeds content ! *Computational Cognitive Science*, 2. 68
- STRACK, F., MARTIN, L. L. et STEPPER, S. (1988). Inhibiting and facilitating conditions of the human smile : a nonobtrusive test of the facial feedback hypothesis. *Journal of personality and social psychology*, 54(5):768. 24
- SUCKSMITH, E., ALLISON, C., BARON-COHEN, S., CHAKRABARTI, B. et HOEKSTRA, R. A. (2013). Empathy and emotion recognition in people with autism, first-degree relatives, and controls. *Neuropsychologia*, 51(1):98–105. 61

- TCHA-TOKEY, K. (2018). *Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif*. Thèse de doctorat, Arts et Métiers. 71
- THOMAS, F., JOHNSTON, O. et ANIMATION, D. (1981). *The illusion of life*. Abbeville Press, New York. 35
- THOMPSON, E. R. (2007). Development and validation of an internationally reliable short-form of the positive and negative affect schedule (PANAS). *Journal of cross-cultural psychology*, 38(2):227–242. 116, 119
- TINWELL, A., GRIMSHAW, M., NABI, D. A. et WILLIAMS, A. (2011). Facial expression of emotion and perception of the Uncanny Valley in virtual characters. *Computers in Human Behavior*, 27(2):741–749. 50
- TINWELL, A., NABI, D. A. et CHARLTON, J. P. (2013). Perception of psychopathy and the Uncanny Valley in virtual characters. *Computers in Human Behavior*, 29(4):1617–1625. 49, 50
- TSAI, J., BOWRING, E., MARSELLA, S., WOOD, W. et TAMBE, M. (2012a). A Study of Emotional Contagion with Virtual Characters. *In Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Virtual Agents, IVA'12*, pages 81–88, Berlin, Heidelberg. Springer. 59
- TSAI, J., BOWRING, E., MARSELLA, S., WOOD, W. et TAMBE, M. (2012b). Emotional Contagion with Virtual Characters. *In Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012), IVA'12*, pages 1–2, Berlin, Heidelberg. Springer. 59
- TYNG, C. M., AMIN, H. U., SAAD, M. N. M. et MALIK, A. S. (2017). The Influences of Emotion on Learning and Memory. *Frontiers in Psychology*, 8. 4, 75, 132
- VALSTAR, M. et PANTIC, M. (2010). Induced disgust, happiness and surprise : an addition to the mmi facial expression database. *In Proc. 3rd Intern. Workshop on EMOTION (satellite of LREC) : Corpora for Research on Emotion and Affect*, page 65. 89
- VAN VUGT, H. C., KONIJN, E. A., HOORN, J. F., KEUR, I. et ELIÉNS, A. (2007). Realism is not all! User engagement with task-related interface characters. *Interacting with Computers*, 19(2):267–280. 74, 135
- VANNOTTI, M. (2002). L'empathie dans la relation médecin-patient. *Cahiers critiques de thérapie familiale et de pratiques de réseaux*, 29(2):213–237. 4, 78

- VELETSIANOS, G. (2009). The impact and implications of virtual character expressiveness on learning and agent-learner interactions. *Journal of Computer Assisted Learning*, 25(4):345–357. 75, 132
- VINAYAGAMOORTHY, V., GILLIES, M., STEED, A., TANGUY, E., PAN, X., LOSCOS, C. et SLATER, M. (2006). Building Expression into Virtual Characters. *The Eurographics Association*, pages 1–42. 35
- VOLONTE, M., BABU, S. V., CHATURVEDI, H., NEWSOME, N., EBRAHIMI, E., ROY, T., DAILY, S. B. et FASOLINO, T. (2016). Effects of Virtual Human Appearance Fidelity on Emotion Contagion in Affective Inter-Personal Simulations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(4):1326–1335. 44, 50, 132
- VON DER PÜTTEN, A. M., KRÄMER, N. C. et GRATCH, J. (2009). Who’s there? Can a Virtual Agent Really Elicit Social Presence? *The 12th Annual International Workshop on Presence*. 73, 111
- VUGT, H. C. V., BAIENSON, J. N., HOORN, J. F. et KONIJN, E. A. (2010). Effects of facial similarity on user responses to embodied agents. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 17(2):7. 66, 74, 134
- WÄCHTER, L., KUHNERT, B. et RAGNI, M. (2006). Empathic Humans Punishing an Emotional Virtual Agent. In *COGSCI - The annual meeting of the cognitive science society*, pages 3478–3483. 68
- WATSON, D., CLARK, L. A. et TELLEGEN, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect : the PANAS scales. *Journal of personality and social psychology*, 54(6):1063. 29, 111, 116, 119, 122, 132
- WEHRLE, T., KAISER, S., SCHMIDT, S. et SCHERER, K. R. (2000). Studying the dynamics of emotional expression using synthesized facial muscle movements. *Journal of personality and social psychology*, 78(1):105. 41
- WEYERS, P., MÜHLBERGER, A., HEFELE, C. et PAULI, P. (2006). Electromyographic responses to static and dynamic avatar emotional facial expressions. *Psychophysiology*, 43(5):450–453. 62, 134
- WICKER, B., KEYSERS, C., PLAILLY, J., ROYET, J.-P., GALLESE, V. et RIZZOLATTI, G. (2003). Both of us disgusted in My insula : the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, 40(3):655–664. 16

- WISESSING, P., DINGLIANA, J. et MCDONNELL, R. (2016). Perception of lighting and shading for animated virtual characters. *In Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, pages 25–29. ACM. xviii, 48, 86
- WISPÉ, L. (1986). The distinction between sympathy and empathy : To call forth a concept, a word is needed. *Journal of personality and social psychology*, 50(2):314. 15
- WU, C.-H., LIN, J.-C. et WEI, W.-L. (2014). Survey on audiovisual emotion recognition : databases, features, and data fusion strategies. *APSIPA transactions on signal and information processing*, 3. xvii, 27
- WU, W., AREFIN, A., RIVAS, R., NAHRSTEDT, K., SHEPPARD, R. et YANG, Z. (2009). Quality of experience in distributed interactive multimedia environments : toward a theoretical framework. *In Proceedings of the 17th ACM international conference on Multimedia*, pages 481–490. ACM. 71
- WU, Y., KALRA, P. et THALMANN, N. M. (1996). Simulation of static and dynamic wrinkles of skin. *In Computer Animation'96. Proceedings. IEEE*, pages 90–97. 28, 39
- YALCIN, N. et DIPAOLO, S. (2018). A computational model of empathy for interactive agents. *Biologically inspired cognitive architectures*, 26:20–25. 58
- ZELL, E., ALIAGA, C., JARABO, A., ZIBREK, K., GUTIERREZ, D., MCDONNELL, R. et BOTSCH, M. (2015). To stylize or not to stylize? : the effect of shape and material stylization on the perception of computer-generated faces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 34(6):184. 41, 45
- ZELL, E., ZIBREK, K. et MCDONNELL, R. (2019). Perception of virtual characters. *In ACM SIGGRAPH 2019 Courses*, page 21. ACM. 43, 44
- ZIBREK, K., KOKKINARA, E. et MCDONNELL, R. (2018). The Effect of Realistic Appearance of Virtual Characters in Immersive Environments-Does the Character's Personality Play a Role? *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(4):1681–1690. 49, 50
- ZIBREK, K., MARTIN, S. et MCDONNELL, R. (2019). Is Photorealism Important for Perception of Expressive Virtual Humans in Virtual Reality? *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 16(3):14. 45, 48

Annexe A

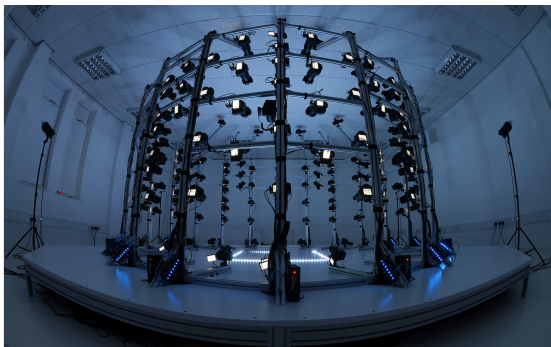
Processus de conception de l'agent virtuel

A.1 L'agent virtuel expressif

Nous avons conçu un humain virtuel réaliste et expressif. Pour cela, nous avons testé différents processus de conception. Au sein des sections suivantes, nous allons détailler et présenter le processus de conception retenu pour la création de l'humain virtuel expressif.

Création de notre agent : technique de photogrammétrie

Afin de créer un humain virtuel réaliste, nous avons acquis des scans 3D sur le site 3D Scan Store¹. Les fichiers proposés sur ce site sont issus de pratique photogrammétrique avec une installation de capture composée de 170 appareils photographiques reflex numériques (Figure B.1a). Suite aux captures, les fichiers sont reconstitués avec le logiciel Agisoft PhotoScan² (Figure B.1b) puis nettoyés avec le logiciel Zbrush³.



(a) Appareils de capture pour photogrammétrie



(b) Exemple d'ajustement dans AgiSoft Photoscan

FIGURE A.1 – Processus de photogrammétrie

Le processus de photogrammétrie est un processus simple qui consiste à retranscrire des personnes ou des objets de façon virtuelle, c'est une technique de scan par photographie. Tout d'abord, le modèle est photographié à de nombreuses reprises avec une grande résolution. Il est nécessaire d'accorder une attention particulière aux ombres et lumières, car les variations de luminosité peuvent impliquer un travail de retouche pour pouvoir utiliser correctement la texture de l'élément scanné. Si les ombres sont trop sombres, il y a également un risque que la reconstruction échoue. Ensuite, en se basant sur les pixels communs de toutes les images, il est possible de mettre en relation les différentes prises de vue et de déduire la position de chaque pixel dans l'espace. Cela va permettre de générer un nuage de points partiellement représentatif de la personne. Suite à cela, tous les points du nuage vont être reliés afin de former des triangles, cela permet d'obtenir un maillage 3D. Enfin, les textures proviennent de

1. <https://www.3dscanstore.com/>

2. Photoscan est un logiciel permettant la restitution d'un modèle 3D à partir de photos.

3. Zbrush est un logiciel de modélisation 3D utilisant une technologie appelée Pixols, c'est-à-dire des pixels 3D contenant des informations sur sa position en abscisse (X), en ordonnée (Y), la valeur de sa couleur, mais également sur sa profondeur (Z).

la même capture photo pendant elles subissent un traitement différent, les images dédiées au scan vont être réutilisées et projetées sur le personnage 3D.

Les scans que nous allons utiliser sont les scans 3D intitulés "*female-02-x36-expression-bundle*". Ils comprennent exclusivement des modèles 3D du visage d'une femme âgée (Figure A.2).

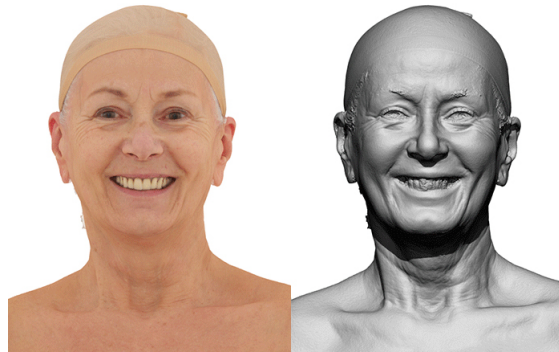


FIGURE A.2 – Photo et scan "Female 02" - Ten24

Nous possédons un scan du visage avec une expression neutre, et sa texture avec une résolution 10 000 x 10 000 pixels, ainsi qu'un package de 36 scans RAW (scans bruts, non nettoyés) avec des textures de 8192x8192 pixels (Figure A.3).

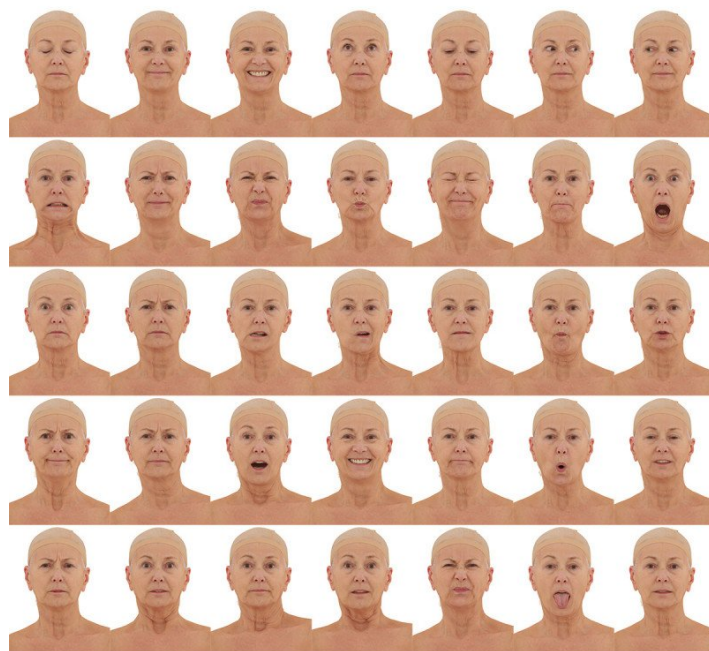


FIGURE A.3 – Package du scan "Female 02" - Ten24

Ne pouvant pas utiliser le modèle neutre en l'état, nous avons optimisé le maillage afin d'obtenir un modèle adapté pour du temps réel (maillage de basse résolution appelé *lowpoly*). Pour cela, nous avons calibré différents points d'ancrage sur le modèle scanné et sur un modèle optimisé pour le temps réel à l'aide du logiciel Wrap 3.3 de R3dS⁴ (Figure A.4).

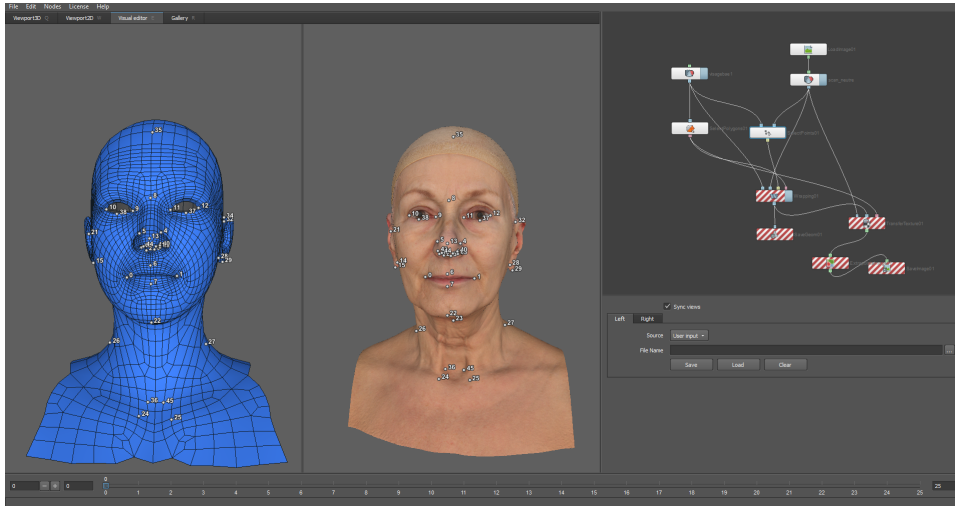


FIGURE A.4 – Points d'ancrage du scan 3D vers le modèle low poly

Afin de fournir un ordre de grandeur, le modèle scanné contient environ un million de polygones alors que notre modèle optimisé du visage comporte 9930 polygones. Ce dernier est adapté pour des moteurs 3D car il respecte les contraintes liées au temps réel.

Les textures issues du scan 3D sont de qualité moyenne et ne correspondaient pas à notre nouveau modèle optimisé. À l'aide du logiciel Wrap 3.3, nous avons transposé la texture du scan puis récupéré la texture adaptée à notre modèle (Figure A.5).

Afin d'améliorer le rendu de la peau de notre humain virtuel expressif tel qu'il est préconisé dans notre revue de littérature, nous avons retravaillé la texture avec le logiciel Substance Painter⁵. Nous avons gommé les imperfections dues au scan, ajouté des informations de transluminescence (SSS), de grain de peau, etc. Suite à ce travail sur le réalisme de l'agent virtuel, nous nous sommes concentrés sur son expressivité.

4. Wrap est un logiciel permettant la retopologie de modèle haute résolution ou de scan 3D dans le but d'obtenir des modèles adaptés aux contraintes du temps réel

5. Substance Painter est un outil permettant de créer une texture à des modèles 3D. Il permet une visualisation des textures en 2D ou directement appliquées sur le modèle 3D

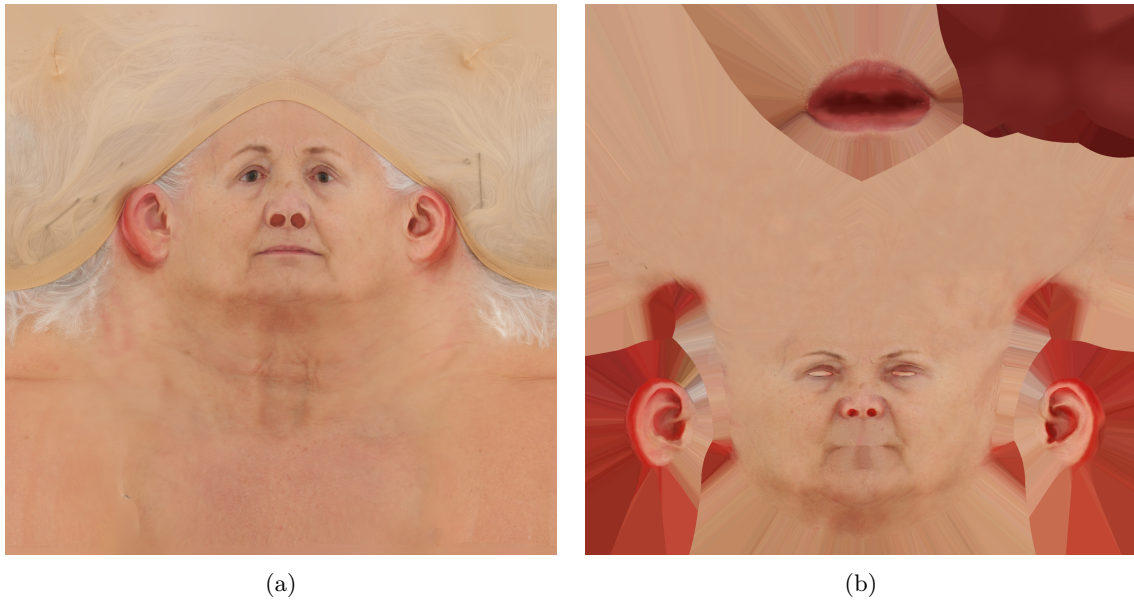


FIGURE A.5 – a) Texture issue du scan 3D et b) texture obtenue après projection sur le modèle *low poly*

Retranscription des émotions sur notre agent

Afin d'obtenir un humain virtuel expressif, nous nous sommes intéressés à la retranscription des émotions sur un humain réel et sur l'humain virtuel, notamment en nous basant sur les travaux de Ekman et Friesen [1978] ainsi que sur les recommandations des chercheurs en interaction humain-machine présentées au sein de notre revue de littérature. Pour cela, nous avons répété le processus appliqué à l'humain virtuel neutre. Nous avons utilisé les scans avec des expressions faciales, nous les avons adaptés aux contraintes temps réel (Figure A.6).

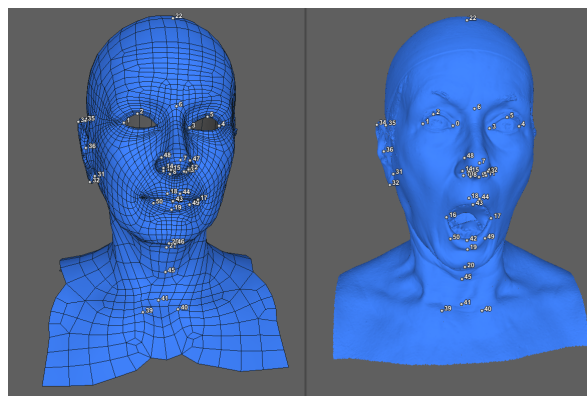


FIGURE A.6 – Récupération des Unités d'Action (AU) à partir des scans

Ensuite, grâce au logiciel 3ds Max⁶, nous avons produit des *blendshapes* correspondant aux Unités d'Action (AU), sur notre humain virtuel. En réalisant des combinaisons d'Unités d'Action, nous sommes en mesure de retranscrire des expressions faciales émotionnelles sur notre agent virtuel, en nous basant sur le FACS de [Ekman et Friesen, 1978] (Tableau A.1).

TABLEAU A.1 – Exemple de tableau de correspondance des AUs pour l'expression des émotions de base

Au/Émotion	Colère	Dégoût	Joie	Peur	Tristesse	Surprise
AU1				X	X	X
AU2				X		X
AU4	X			X	X	
AU5	X			X		X
AU6			X			
AU7	X			X		
AU9		X				
AU10		X				
AU12			X			
AU15		X			X	
AU20				X		
AU21				X		
AU23	X					
AU26				X		X

Après avoir créé les morphers, nous avons listé et travaillé sur les autres facteurs visuels participant à l'expression des émotions. Concernant les rides d'expression, nous avons récupéré les rides à partir des scans 3D pour ajouter du réalisme et de l'expressivité à notre agent. Notons qu'il est également possible de les faire manuellement par un artiste 3D. Dans notre cas, nous avons nettoyé les modèles scannés pour enlever les imperfections, comme sur la figure suivante, puis nous avons transposé les textures sur notre agent virtuel. Nous effectuons de nouveau le même processus avec le logiciel Wrap 3.3 pour transposer les rides d'expression sur notre agent virtuel (Figure A.7).

6. 3ds Max, développé par la société Autodesk, est un logiciel permettant la modélisation et l'animation de modèles 3D

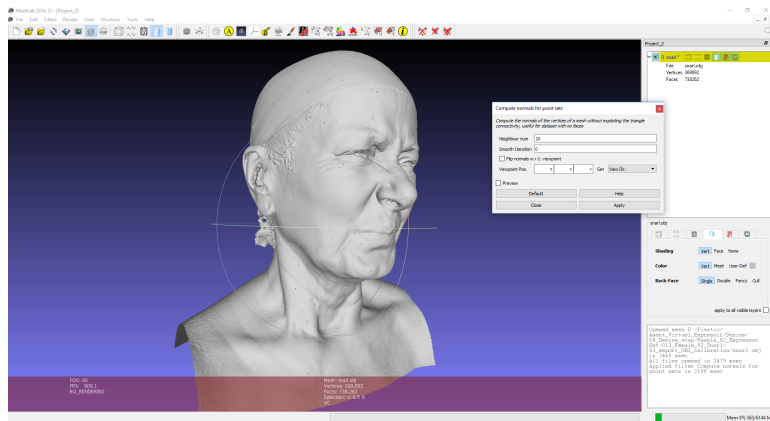
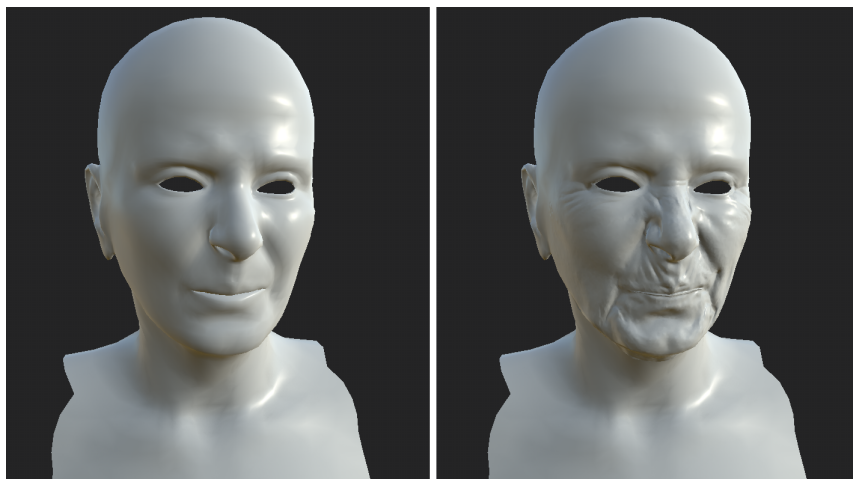


FIGURE A.7 – Nettoyage de scan afin de récupérer les rides d'expression

Nous avons récupéré plusieurs *normal map* à appliquer sur notre modèle 3D, c'est-à-dire la texture contenant les informations de relief. Dans ce cas, elle se nomme *wrinkle map*, soit la texture contenant les informations relatives aux rides (Figure A.8). Ces *wrinkle maps* contiennent notamment les rides du front, les rides nasales et nasolabiales, et les rides de la région oculaire (appelés communément pattes-d'oie). Un *shader* spécifique aux rides d'expression fut créé avec Amplify Shader Editor⁷ afin de pouvoir activer les *wrinkles maps* en fonction de l'activation des différentes Unités d'Action.

FIGURE A.8 – Modèle avant ou après l'application d'une *wrinkle map* sur le maillage du modèle 3D

Afin de représenter les mouvements de contraction et de dilatation des pupilles selon l'état émotionnel, tel que pour un humain réel (Tableau A.2), nous avons créé deux *blendshapes* pour réduire ou agrandir la taille de la pupille.

7. Amplify Shader Editor est un outil permettant la création de *shader*. Ce plugin est compatible avec le moteur de rendu Unity

TABLEAU A.2 – Dilatation ou contraction des pupilles en fonction de l'état émotionnel

Emotion	Dilatation	Contraction
Colère		X
Dégoût		X
Peur	X	
Joie	X	
Tristesse		X
Surprise	X	

Ensuite, nous avons intégré notre humain virtuel dans le moteur de rendu 3D temps réel Unity 3D⁸ et créé toutes les animations des expressions faciales émotionnelles avec les différents facteurs évoqués. Cet humain virtuel, conçu avec des techniques avancées de modélisation sera l'agent utilisé dans l'ensemble de nos expérimentations.

A.2 Améliorations dédiées à la seconde expérimentation

Dans le cadre de la seconde expérimentation, nous avons amélioré notre humain virtuel expressif afin qu'il puisse être intégré au sein d'un simulateur. En effet, l'objectif était de lui ajouter un corps, cependant le scan facial de la personne âgée utilisé précédemment ne disposait pas d'un corps scanné. Il est difficile d'obtenir un scan intégral, cela implique que la personne scannée doit se présenter nue ou en sous-vêtement. Nous avons finalement trouvé le scan du corps d'une jeune femme nue⁹, que nous avons adapté à un maillage optimisé, issu du logiciel Character Creator¹⁰. Dans le logiciel 3DS Max⁶, nous avons ensuite déformé ce maillage en fonction de la morphologie et de l'âge de notre humain virtuel expressif (Figure A.9). Enfin, nous avons travaillé la texture de la peau du corps avec Substance Painter⁵ et nous lui avons ajouté un squelette afin de rendre possible l'animation de réactions corporelles. Ces modifications de maillage ont nécessité d'effectuer de nouveau le *rigging* et le *skinning*¹¹ de notre personnage. Enfin, dans le cadre de nos expérimentations et dans le but d'assurer la crédibilité de notre agent, nous avons également créé des vêtements adaptés à l'âge de notre agent virtuel à l'aide du logiciel Marvelous Designer¹².

8. Unity est un moteur de jeu multi-plateforme (PC, Mac, smartphones, consoles de jeux et web). Il permet notamment de créer des jeux ou des applications en 2D ou 3D.

9. Ce second scan provient de la plateforme 3D Scan Store, il est intitulé "*female-retopology-kit*".

10. Character Creator est un logiciel dédié à la création de personnages, développé par Reallusion.

11. Le *rigging* et le *skinning* sont des techniques liées à l'animation. Le *rigging* permet à un humain virtuel de disposer d'un squelette sous son maillage afin de permettre l'animation. Le *skinning* permet de lier ce squelette avec "la peau" du personnage, c'est-à-dire son maillage.

12. Logiciel développé par CLO Virtual Fashion, il permet la modélisation de vêtements en 2D et en 3D.

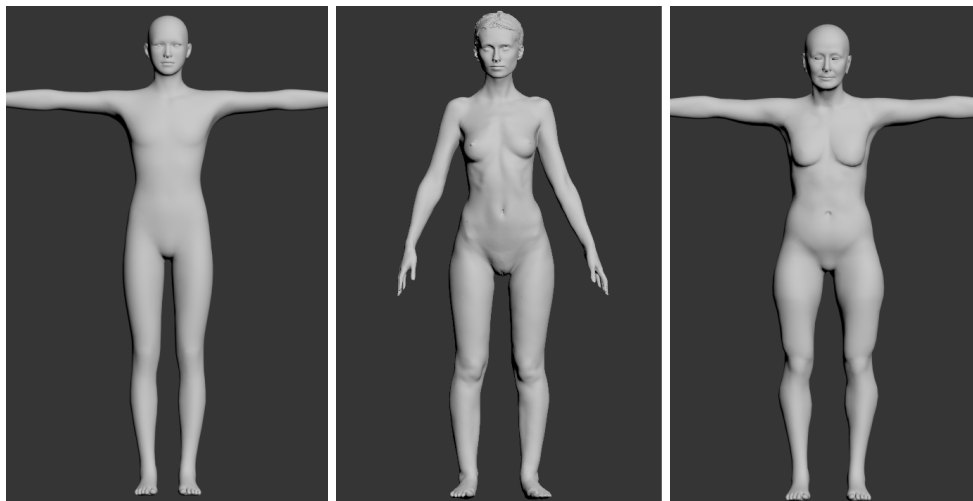


FIGURE A.9 – Adaptation du maillage du corps optimisé (à gauche) et du corps scanné (centre) pour obtenir le corps de l'agent virtuel (à droite).

Enfin, nous avons intégré notre patiente virtuelle dans notre projet Unity. Puis, nous l'avons dotée d'un comportement verbal et non-verbal définis en fonction du scénario, notamment des animations corporelles en adéquation avec les conversations. Concernant les dialogues, les voix ont été enregistrées par des acteurs spécialisés, afin de respecter l'âge de la patiente. Nous avons ensuite créé des morphers pour chaque visème¹³. Puis, dans l'objectif de mettre en place la synchronisation labiale, nous les avons paramétrés avec le plugin LipsyncPro dans Unity 3D (Figure A.10).

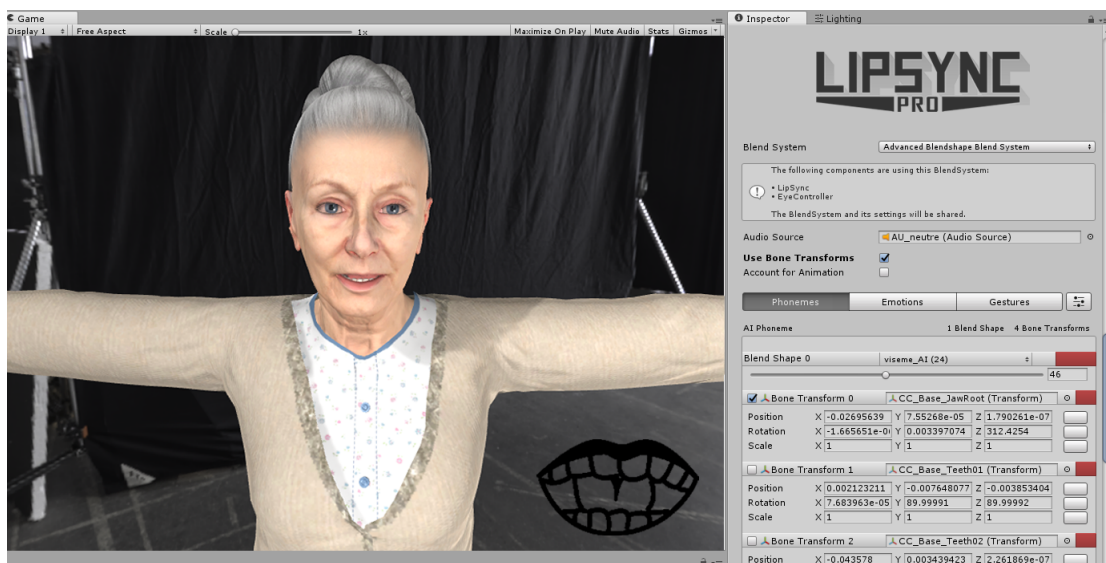


FIGURE A.10 – Création des visèmes avec le plugin Lipsync Pro

13. Expression faciale associée à l'élocution d'un phonème.

Annexe B

Annexes à l'expérimentation 1

B.1 Durée des animations faciales

Les vidéos de l'humain réel et des humains virtuels ont une durée équivalente pour chacune des six émotions affichées.

TABLEAU B.1 – Durée des animations des expressions faciales émotionnelles

Émotion	Colère	Dégoût	Peur	Joie	Tristesse	Surprise
Durée (en secondes)	3	3	2	3	5	3

B.2 Figures complémentaires



FIGURE B.1 – Représentation des émotions de colère et de joie sur l'humain virtuel V

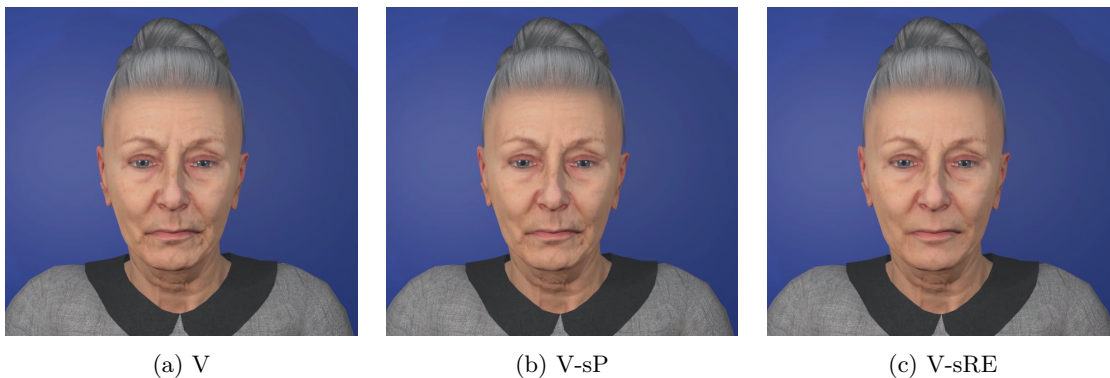


FIGURE B.2 – Représentation de l'émotion de tristesse à la même temporalité dans les conditions V, V-sP et V-sRE.

B.3 Taux de reconnaissance des émotions selon les quatre conditions

TABLEAU B.2 – Résumé des réponses des participants (en %) pour la reconnaissance des émotions sur les humains réels et virtuels

Émotions	Colère	Dégoût	Peur	Joie	Tristesse	Surprise
Humain réel						
Colère	98,78	3,66	0	0	0	0
Dégoût	1,22	96,34	59,76	0	10,97	0
Peur	0	0	39,02	0	4,88	2,44
Joie	0	0	0	100	0	0
Tristesse	0	0	0	0	84,15	1,22
Surprise	0	0	1,22	0	0	96,34
Humain virtuel						
Colère	84,15	10,98	0	0	0	0
Dégoût	9,75	89,02	26,83	0	3,66	0
Peur	2,44	0	52,44	0	3,66	23,17
Joie	0	0	0	100	0	0
Tristesse	2,44	0	1,22	0	92,68	0
Surprise	1,22	0	19,51	0	0	76,83
Humain virtuel sans variation de la taille des pupilles						
Colère	85,37	10,98	0	0	0	0
Dégoût	9,75	89,02	24,39	0	2,44	0
Peur	1,22	0	52,44	0	2,44	26,83
Joie	0	0	0	100	0	0
Tristesse	3,66	0	2,44	0	91,46	0
Surprise	0	0	20,73	0	1,22	73,17
Humain virtuel sans rides d'expression						
Colère	86,58	12,2	0	0	0	1,22
Dégoût	6,1	87,8	15,85	0	2,44	0
Peur	1,22	0	62,2	0	2,44	29,27
Joie	0	0	0	100	0	0
Tristesse	3,66	0	1,22	0	95,12	0
Surprise	1,22	0	20,73	0	0	69,51

Les caractères en gras indiquent le taux de reconnaissance de l'émotion.

B.4 Questionnaire post-expérimentation

Partie 1 : Interface et utilisabilité

1 L'application était-elle simple d'utilisation (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

2 Évaluez la facilité d'utilisation de l'application (5 = Très facile ; 1 = Très difficile)

3 Évaluez la facilité de compréhension du tutoriel (5 = Très facile ; 1 = Très difficile)

4 Avez-vous compris ce qui vous était demandé lors de cette étude ?
(5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

5 Qu'avez-vous pensé de l'application ?

Partie 2 : Les vidéos

6 Aviez-vous compris que toutes les vidéos étaient différentes ?

7 Évaluez votre facilité à reconnaître les émotions exprimées (5 = Très facile ; 1 = Très difficile)

8 Avez-vous remarqué des différences entre les vidéos ?

9 Si oui, lesquelles ?

Partie 3 : L'humain réel

10 Qu'avez-vous pensé de l'humain réel et de son expressivité ?

11 Étiez-vous à l'aise face à l'humain réel imitant les émotions ? (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

12 L'humain réel vous paraît-il expressif ? (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

13 Les émotions de l'humain réel étaient-elles exagérées ? (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

14 Avez-vous eu des difficultés à reconnaître certaines émotions sur l'humain réel ?
(la colère - la joie - le dégoût - la tristesse - la peur - la surprise - non)

15 La représentation de certaines émotions par l'humain réel vous a dérangé ?
(la colère - la joie - le dégoût - la tristesse - la peur - la surprise - non)

Partie 4 : L'humain virtuel

16 Qu'avez-vous pensé de l'humain virtuel et de son expressivité ?

17 Étiez-vous à l'aise face à l'humain virtuel imitant les émotions ?
(5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

18 L'humain virtuel vous paraît-il expressif ? (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

19 Les émotions de l'humain virtuel étaient-elles exagérées ? (5 = Tout à fait ; 1 = Pas du tout)

20 Avez-vous eu des difficultés à reconnaître certaines émotions sur l'humain virtuel ?
(la colère - la joie - le dégoût - la tristesse - la peur - la surprise - non)

21 La représentation de certaines émotions par l'humain virtuel vous a dérangé ?
(la colère - la joie - le dégoût - la tristesse - la peur - la surprise - non)

22 Avez-vous constaté des différences entre les vidéos de l'humain virtuel (autre que le changement d'émotion) ?

Annexe C

Annexes à l'expérimentation 2

C.1 Comparaison des solutions de captations faciales

TABLEAU C.1 – Synthèse des solutions étudiées de captations d'expressions faciales

Dispositif	Nombre de points de tracking	Émotions captées	Informations complémentaires
Affdex de Affectiva	34 points	6 émotions de base + mépris	90% de reconnaissance pour les émotions clés et 80% de précision pour les émotions plus nuancées
Visage Technologies	74 points	6 émotions de base	
EmoVu	environ 50 points	6 émotions de base	
Mood-me		colère dégoût joie peur tristesse	
Noldus	plus de 500 points clé	6 émotions de base + mépris	Combiné avec l'algorithme Deep Face pour obtenir une précision de classification plus élevée
Sightcorp		6 émotions de base	75% de précision pour les expressions faciales
Nviso	143 points	6 émotions de base	

C.2 Documentation des mesures effectuées à l'aide du dispositif Affectiva

Comment sont associées les expressions faciales aux émotions ? ¹

« Les prédicteurs d'émotion utilisent les expressions faciales observées comme données d'entrée pour calculer la probabilité d'une émotion. La cartographie des expressions faciales s'appuie sur les cartographies EMFACS développées par Friesen et Ekman. Une expression faciale peut avoir un effet positif ou négatif sur la probabilité d'une émotion. Le tableau suivant montre la relation entre les expressions faciales et les prédicteurs d'émotions. » (notre traduction)

Emotion	Increase Likelihood	Decrease Likelihood
Joy	Smile	Brow Raise Brow Furrow
Anger	Brow Furrow Lid tighten Eye widen Chin Raise Mouth Open Lip suck	Inner Brow Raise Brow Raise Smile
Disgust	Nose wrinkle Upper Lid Raise	Lip suck Smile
Surprise	Inner Brow Raise Brow Raise Eye Widen Jaw Drop	Brow Furrow
Fear	Inner Brow Raise Brow Furrow Eye widen Lip Stretch	Brow Raise Lip Corner Depressor Jaw Drop Smile
Sadness	Inner Brow Raise Brow Furrow Lip Corner Depressor	Brow Raise Eye Widen Lip Press Mouth Open Lip Suck Smile

1. <https://blog.affectiva.com/>

C.3 Figures complémentaires



FIGURE C.1 – Interface lors des choix de questions



FIGURE C.2 – Tutoriel lors de la phase d'accomodation

C.4 Questionnaire QCAE de Reniers *et al.* [2011]

ID	Questions				
1	J'ai parfois eu du mal à voir les choses du point de vue de la patiente. (reverse)	1	2	3	4
2	En général, je suis objectif(ve) quand je regarde un film ou une pièce de théâtre, et je ne me laisse pas souvent prendre au jeu (reverse).	1	2	3	4
3	En cas de désaccord, j'ai essayé de comprendre le point de vue de la patiente avant de prendre une décision.	1	2	3	4
4	J'ai essayé de mieux comprendre la patiente en imaginant comment les choses se présentaient de son point de vue.	1	2	3	4
5	Quand j'étais en désaccord avec la patiente, j'ai essayé généralement de me mettre à sa place.	1	2	3	4
6	Avant d'émettre un jugement sur la patiente, j'ai essayé d'imaginer ce que je ressentirais si j'étais à sa place.	1	2	3	4
7	Je m'implique souvent émotionnellement dans les problèmes de mes amis	1	2	3	4
8	J'avais tendance à devenir nerveux(se) quand la patiente semblait nerveuse.	1	2	3	4
9	La patiente a eu une forte influence sur mon humeur.	1	2	3	4
10	Cela m'affecte beaucoup quand un(e) de mes ami(e)s semble contrarié(e).	1	2	3	4
11	Je m'implique souvent profondément dans les sentiments d'un personnage de film, d'une pièce de théâtre ou de roman.	1	2	3	4
12	Je suis bouleversé(e) quand je vois quelqu'un pleurer.	1	2	3	4
13	J'étais heureux(se) lorsque la patiente l'était, et triste quand elle l'était.	1	2	3	4
14	Cela m'inquiète quand la patiente s'inquiète et panique.	1	2	3	4
15	Je remarque facilement si quelqu'un veut participer à une conversation.	1	2	3	4
16	J'ai rapidement remarqué quand la patiente ne pensait pas ce qu'elle disait.	1	2	3	4
17	C'est difficile pour moi de comprendre pourquoi certaines choses bouleversent autant les gens. (reverse)	1	2	3	4
18	J'ai trouvé facile de me mettre à la place de la patiente.	1	2	3	4
19	J'ai facilement deviné ce que la patiente ressentait.	1	2	3	4
20	J'étais prompt(e) à repérer quand la patiente se sentait mal à l'aise.	1	2	3	4
21	Les gens disent que je suis doué(e) pour comprendre ce qu'ils ressentent ou ce qu'ils pensent.	1	2	3	4
22	Je pouvais facilement dire si la patiente était intéressée ou ennuyée par ce que je disais.	1	2	3	4
23	Mes amis me parlent de leurs problèmes en me disant que je suis très compréhensif(ve).	1	2	3	4
24	Je peux habituellement sentir si je dérange même si personne ne me l'évoque.	1	2	3	4
25	J'ai facilement deviné de quoi la patiente voulait me parler.	1	2	3	4
26	J'étais en capacité de dire si la patiente masquait ses vraies émotions.	1	2	3	4
27	J'étais doué(e) pour prédire ce que la patiente allait faire.	1	2	3	4
28	J'ai pu apprécier le point de vue de la patiente, même lorsque je n'étais pas d'accord avec elle.	1	2	3	4
29	Habituellement, je reste détaché(e) émotionnellement quand je regarde un film. (reverse).	1	2	3	4
30	J'ai essayé de tenir compte des sentiments de la patiente avant de faire quoique ce soit.	1	2	3	4
31	Avant de faire quoique ce soit, j'ai essayé d'imaginer comment la patiente allait réagir.	1	2	3	4

1 = Pas du tout d'accord, 2 = Plutôt pas d'accord, 3 = Plutôt d'accord, 4 = Tout à fait d'accord

C.5 Questionnaire présence sociale et engagement

ID	Questions					
1	J'ai remarqué la patiente.	1	2	3	4	5
2	La présence de la patiente était évidente pour moi.	1	2	3	4	5
3	La patiente a attiré mon attention.	1	2	3	4	5
4	J'ai parfois été influencé(e) par l'humeur de la patiente.	1	2	3	4	5
5	Les sentiments de la patiente ont influencé l'ambiance de nos échanges.	1	2	3	4	5
6	Les attitudes et l'humeur de la patiente ont influencé ce que je ressentais.	1	2	3	4	5
1 = Pas du tout d'accord, 2 = Plutôt pas d'accord, 3 = Indifférent						
4 = Plutôt d'accord, 5 = Tout à fait d'accord						
1	Cette partie du simulateur était intéressante.	1	2	3	4	5
2	Cette partie de l'application et sa patiente virtuelle étaient intéressantes sur le plan esthétique.	1	2	3	4	5
3	Cette partie du simulateur a fait appel à mes sens.	1	2	3	4	5
4	Cette partie du simulateur en valait la peine.	1	2	3	4	5
5	Cette partie de mon expérience a été enrichissante.	1	2	3	4	5
6	Je me suis senti(e) intéressé(e) par cette partie de l'expérience.	1	2	3	4	5
1 = Pas du tout d'accord, 2 = Plutôt pas d'accord, 3 = Indifférent						
4 = Plutôt d'accord, 5 = Tout à fait d'accord						

C.6 Questionnaire post-expérimentation

ID	Questions					
1	Il y avait une différence entre la patiente virtuelle intégrée dans la première partie du simulateur (situation 1) et celle de la deuxième partie (situation 2), l'avez-vous remarquée ?					
2	Je me suis senti(e) impliqué(e) émotionnellement avec la patiente de la première partie du simulateur.	1	2	3	4	5
3	Je me suis senti(e) impliqué(e) émotionnellement avec la patiente de la seconde partie du simulateur.	1	2	3	4	5
4	Je trouve que la patiente virtuelle de la première partie du simulateur était expressive.	1	2	3	4	5
5	Je trouve que la patiente virtuelle de la seconde partie du simulateur était expressive.	1	2	3	4	5
6	J'ai ressenti de l'empathie pour la patiente de la première partie du simulateur.	1	2	3	4	5
7	J'ai ressenti de l'empathie pour la patiente de la seconde partie du simulateur.	1	2	3	4	5
8	L'expressivité de la patiente virtuelle m'a semblé être un élément important pour la conception d'un simulateur en soins infirmiers.	1	2	3	4	5
9	Pensez-vous que ce type de simulateur est bénéfique pour la formation en soins infirmiers ?	1	2	3	4	5
10	Avez-vous des remarques supplémentaires ?					

1 = Pas du tout d'accord, 2 = Plutôt pas d'accord, 3 = Indifférent
4 = Plutôt d'accord, 5 = Tout à fait d'accord

C.7 Matrice de corrélation concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement

TABLEAU C.2 – Matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 1.

	PP	S	CE	RPR	PER	CO	IEP	E	Sa
Prise de perspective (PP)	-	0,375**	0,143	0,076	0,085	0,136	0,245	0,436**	0,330*
<i>p</i>	-	0,006	0,311	0,592	0,549	0,337	0,080	0,001	0,017
Simulation (S)		-	0,458**	0,344*	0,218	0,284*	0,481**	0,361**	0,213
<i>p</i>		-	0,001	0,012	0,120	0,041	0,000	0,009	0,129
Contagion émotionnelle (CE)			-	0,517**	0,174	0,371**	0,577**	0,240	0,212
<i>p</i>			-	0,000	0,217	0,007	0,000	0,087	0,132
Réactivité proximale (RPR)				-	0,376**	0,318*	0,348*	0,366**	0,166
<i>p</i>				-	0,006	0,022	0,012	0,008	0,239
Réactivité périphérique (RPE)					-	0,126	0,153	0,132	-0,076
<i>p</i>					-	0,374	0,278	0,351	0,592
Co-présence (CO)						-	0,274*	0,448**	0,239
<i>p</i>						-	0,050	0,001	0,088
Interdépendance perçue (IEP)							-	0,350*	0,365**
<i>p</i>							-	0,011	0,008
Esthétique (E)								-	0,414**
<i>p</i>								-	0,002
Satisfaction (Sa)									-
<i>p</i>									-

p* < 0,05 ; *p* < 0,01

TABLEAU C.3 – Matrice de corrélation de Spearman concernant les dimensions de l'empathie, la présence sociale et l'engagement utilisateur lors de la situation 2.

	PP	S	CE	RPR	PER	CO	IEP	E	Sa
Prise de perspective (PP)	-	0,372**	0,239	0,266	0,240	0,162	0,414**	0,361**	0,258
<i>p</i>	-	0,007	0,088	0,057	0,086	0,252	0,002	0,009	0,065
Simulation (S)		-	0,444**	0,478**	0,282*	0,395**	0,461**	0,546**	0,488**
<i>p</i>		-	0,001	0,000	0,043	0,004	0,001	0,000	0,000
Contagion émotionnelle (CE)			-	0,485**	0,085	0,249	0,654**	0,189	0,236
<i>p</i>			-	0,000	0,548	0,075	0,000	0,180	0,092
Réactivité proximale (RPR)				-	0,376**	0,224	0,517**	0,395**	0,256
<i>p</i>				-	0,006	0,111	0,000	0,004	0,067
Réactivité périphérique (RPE)					-	0,064	0,272	0,276*	0,117
<i>p</i>					-	0,651	0,051	0,047	0,410
Co-présence (CO)						-	0,283*	0,217	0,250
<i>p</i>						-	0,042	0,122	0,073
Interdépendance émotionnelle perçue (IEP)							-	0,394**	0,290*
<i>p</i>							-	0,004	0,037
Esthétique (E)								-	0,574**
<i>p</i>								-	0,000
Satisfaction (Sa)									-
<i>p</i>									-

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

Anne-Sophie MILCENT

Les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction de l'empathie chez l'utilisateur : application au domaine de la formation médicale.

Résumé

Les travaux de cette thèse de doctorat portent sur les agents virtuels expressifs et leur impact sur l'induction d'empathie chez l'utilisateur. L'évolution des techniques de l'informatique graphique permet aujourd'hui de créer des agents virtuels réalistes au niveau visuel et comportemental. L'expressivité des agents est un enjeu important pour les interactions humain-machine. Cependant, il est encore peu fréquent que les agents virtuels soient dotés d'expressions faciales, limitant alors leur possibilité d'induire de l'empathie chez l'utilisateur. Nos travaux font suite aux perspectives de recherche concernant la retranscription des émotions sur un agent virtuel, et contribuent à étendre les connaissances concernant les interactions avec les agents, notamment l'impact de leur expressivité sur la mise en place d'une situation empathique. Pour mener à bien ces travaux, nous avons conduit deux expérimentations. Notre première expérimentation porte sur la reconnaissance des émotions de base sur un agent virtuel conçu à partir de techniques de modélisation avancée. Cette étude a également permis d'évaluer la pertinence de facteurs d'expressivité humaine sur l'agent, notamment les rides d'expression et la variation de la taille pupillaire en fonction de l'état émotionnel, pour faciliter la perception des émotions de celui-ci. Notre seconde expérimentation porte sur l'impact de l'expressivité faciale de l'agent virtuel sur l'empathie de l'utilisateur. Dépendants du contexte, les résultats démontrent que la prise de perspective de l'utilisateur, composante cognitive de l'empathie, est plus importante lorsque l'agent virtuel réaliste possède des expressions faciales. Enfin, nous avons étudié l'impact de l'expressivité des agents sur l'engagement et la présence sociale de l'utilisateur. Cette étude ouvre des perspectives concernant une potentielle corrélation entre les notions d'empathie, de présence sociale et d'engagement.

Mots-clés : Agent virtuel ; expressivité ; empathie ; réalisme ; émotions ; santé.

Abstract

The work of this PhD thesis focuses on the expressive virtual agents and their impact on the user empathy induction. The evolution of computer graphics techniques now makes it possible to create virtual agents that are visually and behaviorally realistic. The expressiveness of agents is an important issue for human-computer interactions. However, it is still rare for virtual agents to be equipped with facial expressions, thus limiting their ability to induce empathy in the user. Our work follows up on the perspectives opened by researchers in the field concerning the transcription of emotions on a virtual agent, and contributes to extend the knowledge concerning interactions with agents, in particular the impact of their expressiveness on the implementation of an empathetic situation. To carry out this work, we conducted two experiments. The first one deals with the recognition of basic emotions on a virtual agent designed using advanced modeling techniques. This study also allowed us to evaluate the relevance of human expressiveness factors on the agent, notably the presence of expression wrinkles and the variation of pupil size according to the emotional state, to facilitate the perception of the agent's emotions. Our second experiment focuses on the impact of the virtual agent's facial expressiveness on the user's empathy. Depending on the context, the results show that user's perspective taking, the cognitive component of empathy, is greater when the realistic virtual agent presents emotional facial expressions compared to an agent who has no facial expressions. Finally, we studied the impact of the agents' expressiveness on the user's engagement and social presence. This study opens perspectives on a potential correlation between the notions of empathy, social presence and engagement.

Keywords : Virtual agent ; expressiveness ; empathy ; realism ; emotions ; health.