



HAL
open science

Étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique

Camille Sagnier

► **To cite this version:**

Camille Sagnier. Étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique. Psychologie. Université de Picardie Jules Verne, 2019. Français. NNT : 2019AMIE0067 . tel-03637171

HAL Id: tel-03637171

<https://theses.hal.science/tel-03637171>

Submitted on 11 Apr 2022

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

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



Thèse de Doctorat

Spécialité Psychologie (Psychologie du travail et Ergonomie)
présentée à l'École Doctorale en Sciences Humaines et Sociales (ED 586)
de l'Université de Picardie Jules Verne

par

Camille SAGNIER

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

*Étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle
dans l'industrie aéronautique*

Soutenue le 17 décembre 2019, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

Marc-Éric BOBILLIER CHAUMON, Rapporteur
Professeur des Universités, CNAM de Paris

Jean-Marie BURKHARDT, Rapporteur
Directeur de recherche, IFSTTAR

Julien NELSON, Examineur
Maître de conférences, Université de Paris Descartes

Jean KASPERSKI, Invité
Ergonome, Stelia Aerospace

Émilie LOUP-ESCANDE, Co-directrice de thèse
Maître de conférences HDR, Université de Picardie Jules Verne

Gérard VALLÉRY, Directeur de thèse
Professeur des Universités, Université de Picardie Jules Verne

Thèse co-financée par le Conseil Régional des Hauts-de-France et par le FEDER
(Fonds Européen de Développement Régional) dans le cadre du projet LEON
(acceptabilité des technologies émergentes dans l'industrie aéronautique)



REMERCIEMENTS

J'adresse mes premiers remerciements à mes directeurs de thèse. Je l'ai souvent dit (rarement devant vous) : je sais combien j'ai de la chance d'avoir eu des directeurs de thèse aussi bienveillants et encourageants.

Émilie, merci de m'avoir fait confiance dans la réalisation de cette recherche. Merci pour ta motivation, pour tes conseils avisés, pour tout ce que tu m'as appris, mais aussi pour la façon dont tu m'as guidée : tu as su me rassurer quand il le fallait (très souvent !) et me motiver quand j'en avais besoin. Je garderai un excellent souvenir de ces années de collaboration.

Gérard, vous avez joué un rôle central dans mon parcours et dans la construction de la personne que je suis aujourd'hui. Je suis admirative de la façon dont vous transmettez avec passion votre amour de l'ergonomie et de la psychologie du travail. J'apprécie également votre enthousiasme et votre curiosité, ainsi que votre bienveillance envers vos étudiants. Merci de m'avoir suivie dès le master 1, et de m'avoir encouragée toutes ces années. Cette thèse n'aurait pas été la même sans vos « petites remarques » sur mes présentations et sur mes écrits, qui m'ont permis de me questionner et de construire une thèse qui, je le pense, me ressemble.

Je souhaite également remercier Marc-Éric Bobillier Chaumon et Jean-Marie Burkhardt de me faire l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse, ainsi que Julien Nelson pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, d'abord en tant que membre de mon comité de suivi de thèse et en prenant part à mon jury.

Merci également à Jean Kasperski d'avoir accepté de participer à mon jury comme invité. C'est grâce à la confiance que tu m'as accordée lors de mon master 2 que j'ai pu entreprendre ce travail. Je n'oublie pas non plus que tu as grandement facilité la réalisation de ma recherche.

Je tiens à remercier les partenaires du projet LEON, qui m'ont permis de réaliser cette thèse. Merci à Stelia Aerospace de m'avoir donné l'opportunité de mener ces études. Je remercie surtout les personnes (que je ne citerai pas pour préserver leur anonymat) qui ont accepté que je participe à leurs projets. Merci de leur confiance, d'autant plus que j'enregistrais des données sensibles, mais aussi de leur investissement lors des entretiens. Ces moments partagés autour de la réalité virtuelle, mais également autour de votre travail resteront parmi les meilleurs moments de cette thèse. Je pense tout particulièrement aux chargés de réalité virtuelle, qui ont partagé avec passion leurs expériences avec moi.

Je pense également aux seconds partenaires du projet LEON : Domitile Lourdeaux et à Indira Thouvenin de l'équipe Heudiasyc de l'UTC. Merci de m'avoir permis de réaliser cette étude. Je souhaite remercier tout particulièrement Samba Drame, qui s'est grandement impliqué dans le développement de l'environnement virtuel, et avec moi dans la gestion des passations.

L'expérimentation menée lors de cette thèse n'aurait pas été la même sans la très forte implication des étudiants. Merci à Savinien Colinet pour sa motivation et sa rigueur dans le respect du protocole. Je suis heureuse d'avoir partagé avec toi des moments de détente autour de confiseries et de soda pendant ces semaines chargées. Merci également à Laura Liepchitz, Julie Berteaux et Yuchen Qiu, qui se sont démenées pour recruter un maximum de participants. Je pense que votre

enthousiasme et votre sérieux ont grandement contribué à motiver les étudiants à venir jusqu'à nous.

Je reconnais également la chance que j'ai eu de partager mon quotidien auprès de personnes inspirantes, motivantes et bienveillantes. J'ai eu plaisir à partager mes journées avec les doctorants et les enseignants-chercheurs du CRP-CPO. Vous avez contribué à rendre ces années de thèse heureuses. Un merci tout particulier à Mathieu, Yannick et Véronique avec qui j'ai partagé de beaux moments de fous rires. Vous m'avez également beaucoup appris sur le métier d'enseignant-chercheur. Je me rappellerai également de vos petits mots d'encouragements.

Je tiens tout particulièrement à remercier les doctorants du CRP-CPO, qui sont pour moi la grande force de l'équipe. Je commencerai par la « première vague » de doctorants, ceux qui m'ont accueilli à bras ouverts et qui m'ont fait me sentir à ma place. Merci à Fannie (je me souviens que tu es celle qui a préparé mon bureau !), à Claire, à Alexandre, à Laurie, à Fabien, à Milka et à Perrine. Ma formation doctorale a reposé en grande partie sur vos conseils et sur vos explications.

J'ai eu plaisir à côtoyer aussi les doctorants arrivés après moi, dont il faut pointer la sympathie ET l'implication. Merci à Ugo, Julie, Léo, Pauline, Olive et Dalina. Je suis certaine que vous avez passé et que vous passerez des moments inoubliables dans ce labo.

Je pense également à deux doctorants qui sont devenus des amis. Merci à Federica pour sa bonne humeur, pour ses propositions de pauses café, mais aussi pour ses conseils précieux pour la réalisation de cette thèse. Ton parcours est inspirant pour moi et pour tous les doctorants qui viendront après moi. Merci à Geoffrey de m'avoir fait tant rire, de m'avoir souvent rassurée et d'avoir partagé avec moi les meilleurs et les pires moments de nos thèses respectives. Je suis heureuse d'avoir croisé ton chemin (et d'avoir partagé avec toi un mandat de représentant des doctorants).

Mille mercis à Élodie de m'avoir soutenu du début à la fin de ma thèse. Merci pour toutes les choses que tu m'as apprises, et surtout pour ton énorme travail de relecture de ce manuscrit. Tu m'as encouragée à ne rien lâcher lors des dernières semaines. Je t'en suis éternellement reconnaissante.

Je tiens également à remercier Noémie, Nina et Sami, avec qui j'ai participé aux séminaires en ergonomie et en psychologie du travail. Merci pour ces moments sérieux et pour votre aide, mais je retiendrai surtout les bons moments autour de verres ou lors de congrès. J'ai eu plaisir à partager mes années de thèse avec vous.

Enfin, je terminerai ces remerciements pour les membres du CRP-CPO en adressant quelques mots à deux personnes qui ont été centrales dans ces années de thèse. Nicolas et Dimitri, merci d'avoir été plus que des voisins de bureau, mais de vrais « copains de labo ». Évidemment, avec le recul, nous avons peut-être mangé bien trop gras, ou bien un peu trop procrastiné, mais ces moments avec vous (au sushi, en E310, au bowling) étaient parmi les meilleurs de mes trois années de thèse. Nicolas, je suis admirative de ton parcours, de ta culture, de ton intelligence et de ta bienveillance. J'ai eu beaucoup de chance d'être ta voisine et de partager avec toi tous ces moments à refaire le monde. Dimitri, merci de m'avoir tant soutenue. J'envie ta rigueur et ta persévérance dans tout ce que tu entreprends. Tu as été motivant pour moi à la fois parce que tu accomplis tellement et parce que tu as su me rassurer lors des moments de doutes et m'encourager tous les jours.

Je tiens maintenant à remercier mon entourage extérieur à la thèse, que j'ai parfois négligé... Merci à Aymeric et Florent d'avoir été les premiers relecteurs de cette thèse. J'ai été sincèrement touchée de votre investissement et de vos encouragements. C'est toujours un plaisir de partager des moments avec vous, à la fois drôles et sérieux. J'ai hâte d'en partager de nouveaux.

Merci à Étienne pour les moments autour de verres, autour de bons petits plats ou autour de jeux de société. Tu m'as souvent aidée à relativiser et tu es un de ceux qui a suivi de près mon travail.

Je remercie mon groupe de copines : Anaïs, Charlotte, Laura, Florine et Mathilde. Les soirées passées ensemble ont été de vrais moments de détente pour moi. Je suis heureuse d'avoir trouvé une équipe aussi encourageante, bienveillante et intéressée par les autres. Je suis heureuse de partager avec vous mes victoires.

J'ai aussi la chance de pouvoir compter sur une amie exceptionnelle. Merci à toi, Laura, de me suivre depuis toutes ces années. Tu m'as encouragée à toutes les étapes les plus importantes de ma vie et tu as su m'inspirer à donner le meilleur de moi-même. Je sais que notre amitié nous aide à traverser les mauvais moments et à profiter encore plus des meilleurs, et je suis heureuse de pouvoir compter sur ton soutien sans faille.

J'aimerais également remercier ma famille pour son soutien. Nous avons beaucoup de chance de pouvoir compter les uns sur les autres et de tout partager (dont notre amour des pulls moches de Noël). Merci à Mamie, Christelle, Mélanie, Fabien, Marie, Antoine et Laurent. Même en grandissant, les réunions de famille sont restées les mêmes : des moments que j'attends avec impatience. Je pense également à la famille Sagnier et aux moments partagés avec Mémé, Dominique, Yves, Erwan, Elodie et les enfants. J'ai toujours plaisir à vous voir, et j'ai hâte de passer davantage de temps avec vous.

Je tiens à remercier tout particulièrement quatre personnes qui m'accompagnent dans tout ce que j'entreprends : mes parents et mes frère et sœur. Merci à toi, Papa, d'être un père affectueux, une personne à qui on peut facilement se confier et d'être d'excellent conseil. Tu m'encourages à m'affirmer et à vaincre ma timidité. Merci à toi, Maman, pour l'intérêt que tu me portes, pour tes mots rassurants et pour les moments que nous partageons à deux. Tu m'as appris à donner le meilleur de moi-même et tu m'aides à relativiser. Jeremy, je ne pourrais jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi. Merci pour tes conseils, tes relectures minutieuses et tes encouragements. J'aime tes paradoxes : ton intelligence, ta rigueur, ton sérieux, ta culture impressionnante, mais aussi tes oublis fréquents (tes lunettes, ta carte bleue, tes rendez-vous), ton humour et ton enthousiasme. Pauline, je suis heureuse de pouvoir tout partager avec toi. J'ai couru avec toi 3 mètres du marathon, alors que tu m'as épaulée quasiment quotidiennement pendant ces 3 années de thèse, et toutes celles qui ont précédé. Tu es un exemple pour moi, à la fois de persévérance et de dépassement de soi, mais aussi d'altruisme.

Enfin, merci à Romain. Merci d'avoir été le compagnon idéal de ces trois années. Tu as été là pour moi à la fin des bonnes journées, pour que nous fêtions ensemble les victoires, et à la fin des mauvaises, pour atténuer les déceptions. Ta présence m'a permis d'aller au bout de ce projet. Je sais que j'ai beaucoup de chance de t'avoir rencontré.

RÉSUMÉ

On considère aujourd'hui que l'industrie entre dans une nouvelle ère industrielle, dont on fait référence sous les termes d'Industrie 4.0, d'Industrie du futur ou encore d'Usine du futur. Dans ce contexte, les entreprises françaises implantent de nouvelles technologies afin d'améliorer leur production, d'être plus innovantes, plus récentes, plus flexibles et plus compétitives. La réalité virtuelle fait partie de ces technologies. Pourtant, pour que son implantation présente des bénéfices pour les entreprises, encore faut-il que les individus l'utilisent.

C'est de cette question que traitait cette thèse. Elle visait à identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique. Deux versants de l'acceptation de la réalité virtuelle ont été étudiés : d'une part, les perceptions des utilisateurs sur cette technologie et leurs intentions de l'utiliser et, d'autre part, leur utilisation réelle de la technologie. Cinq études ont été menées. Les trois premières portaient sur l'*acceptation* de la réalité virtuelle, dans des situations de revues de projet. Les deux dernières portaient sur son *acceptabilité* auprès de non-utilisateurs également pour des revues de projet, et auprès de potentiels futurs utilisateurs pour la formation à l'assemblage aéronautique. Des entretiens semi-directifs ont été menés auprès des utilisateurs et des non-utilisateurs. Pour les études portant sur l'acceptation de la réalité virtuelle, ils ont été combinés à une analyse des comportements des utilisateurs et de leurs communications lors des sessions. La cinquième étude consistait en une expérimentation, où nous avons recueilli les perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle par l'intermédiaire de questionnaires.

Nos résultats montrent le rôle central de l'utilité perçue dans l'acceptabilité et dans l'acceptation de la réalité virtuelle. Nous expliquons ce jugement d'utilité en le reliant à des besoins des utilisateurs satisfaits par les sessions en réalité virtuelle et par des bénéfices sur les outils qu'ils utilisent habituellement. Nous avons également identifié des critères sur lesquels s'appuient les utilisateurs pour décider d'utiliser ou non la réalité virtuelle. L'importance relative des perceptions des utilisateurs sur les caractéristiques de la technologie est également discutée.

En conclusion, nous revenons sur les principaux apports de cette thèse d'un point de vue théorique et méthodologique et nous expliquons les questionnements que la conduite de cette recherche a ouverts. Nous présentons ensuite les implications pratiques de nos résultats. Nous discutons également des limites de nos études ainsi que des perspectives de recherche qui émergent de ce travail de recherche. Enfin, nous partageons nos réflexions sur les apports de l'ergonomie à l'étude de l'acceptabilité des technologies.

Mots-clés : réalité virtuelle ; acceptabilité ; acceptation ; industrie ; ergonomie

Thèse co-financée par le Conseil Régional des Hauts-de-France et par le FEDER
(Fonds Européen de Développement Régional) dans le cadre du projet LEON
(acceptabilité des technologies émergentes dans l'industrie aéronautique)



STUDY OF THE ACCEPTANCE OF VIRTUAL REALITY IN THE AERONAUTIC INDUSTRY

ABSTRACT

Today, we consider that industry is entering a new industrial era, known as Industry 4.0, Industry of the Future or Factory of the Future. In this context, French companies start to implement new technologies in order to improve their production, to be more innovative, up-to-date, more flexible and more competitive. Virtual reality is one of these technologies. However, virtual reality can be beneficial for companies only if workers use it.

We addressed this question in this thesis. Our work aimed to identify factors of acceptance and rejection of virtual reality in the aeronautics industry. We studied two sides of the acceptance of virtual reality: on the one hand, users' perceptions of this technology and their intentions to use it and, on the other hand, their actual use of the technology. We conducted five studies. In the first three studies, we focused on the acceptance of virtual reality in the framework of project reviews. In the last two studies, we examined its acceptability to non-users when used for project reviews, and to potential future users for aircraft assembly training. We conducted semi-structured interviews with both users and non-users. For our studies on the acceptance of virtual reality, we combined the interviews with the analysis of user behaviors and user communications during the sessions. The fifth study was an experiment, during which we collected users' perceptions of virtual reality via questionnaires.

Our results show the significant role played by perceived usefulness in the acceptability and the acceptance of virtual reality. We explain this perception by linking it to the satisfaction of user needs during the virtual reality sessions and by its presenting advantages over the tools to which they are used. Moreover, we identified users' criteria for deciding whether to use virtual reality. The relative importance of users' perceptions of the characteristics of the technology is also discussed.

In the conclusion, we review the main contributions of this thesis from a theoretical and methodological point of view and we tackle the questions raised by this research. Then, we present the practical implications of our results. We also discuss the limitations of our studies as well as possible direction for future research. Finally, we share our thoughts on the contributions of ergonomics to the study of the acceptance of technologies.

Keywords: virtual reality; acceptance; acceptability; industry; ergonomics

REMARQUE RELATIVE AUX NORMES APA APPLIQUÉES DANS CE MANUSCRIT

La septième édition des normes APA a paru en octobre 2019 (American Psychological Association, 2019), soit lors des dernières semaines de la rédaction de ce manuscrit. Ce dernier est donc rédigé selon les normes de la sixième édition.

SOMMAIRE

Introduction générale	2
Partie I. Cadre théorique	5
<i>Chapitre 1. La réalité virtuelle et ses applications</i>	5
1. Quelques éléments de définition.....	5
1.1. Les termes de « réalité virtuelle ».....	5
1.2. La finalité de la réalité virtuelle.....	6
1.3. Une définition fonctionnelle de la réalité virtuelle.....	6
1.4. Une définition technique de la réalité virtuelle.....	7
2. Le modèle de référence en réalité virtuelle.....	8
3. Les principaux dispositifs d'interaction.....	10
3.1. Les dispositifs de présentation visuelle.....	10
3.2. Les dispositifs de capture de mouvement et de position.....	11
3.3. Les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés.....	12
3.4. Les dispositifs d'entrée et de présentation sonore.....	13
4. Les principales applications de la réalité virtuelle.....	13
5. Les applications de la réalité virtuelle dans l'industrie.....	14
<i>Chapitre 2. Différents concepts centraux dans l'étude de l'interaction entre l'homme et la réalité virtuelle</i>	19
1. L'utilisabilité.....	19
1.1. Définitions de l'utilisabilité.....	19
1.2. Méthodes d'évaluation de l'utilisabilité.....	21
2. L'utilité.....	26
2.1. Définitions de l'utilité.....	26
2.2. Méthodes d'évaluation de l'utilité.....	26
3. L'immersion et l'interaction.....	28
3.1. Définitions de l'immersion et de l'interaction.....	28
3.2. Méthodes d'évaluation de l'immersion et de l'interaction.....	29
4. La présence.....	30
4.1. Définitions de la présence.....	30
4.2. Méthodes d'évaluation de la présence.....	32
5. Le mal des environnements virtuels.....	35
5.1. Définition du mal des environnements virtuels.....	35
5.2. Méthodes d'évaluation du mal des environnements virtuels.....	37
<i>Chapitre 3. Les approches théoriques et méthodologiques de l'acceptabilité des technologies</i>	41
1. L'acceptabilité pratique : concevoir une interaction optimale entre l'utilisateur et la technologie.....	42
1.1. Des dimensions instrumentales.....	42
1.2. Des dimensions non-instrumentales.....	44
1.3. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptabilité pratique.....	48

1.4. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptabilité pratique	49
2. L'acceptabilité sociale : prédire l'usage de la technologie.....	49
2.1. L'acceptabilité en termes de satisfaction de l'utilisateur	50
2.1.1. Modèle du succès d'une technologie (DeLone & McLean, 1992, 2003)	50
2.1.2. Théorie de la disconfirmation des attentes en marketing (Oliver, 1980, 1981)	52
2.1.3. Théorie de la disconfirmation des attentes, adaptée aux technologies (Bhattacharjee, 2001)	52
2.2. Les modèles d'acceptabilité basés sur les perceptions de la technologie par les individus	53
2.2.1. Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 1989).....	53
2.2.2. Technology Acceptance Model 2 (TAM2) (Venkatesh & Davis, 2000)	55
2.2.3. Technology Acceptance Model (TAM3) (Venkatesh & Bala, 2008)	56
2.2.4. Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) (Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003).....	59
2.2.5. Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT2) (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012).....	60
2.3. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale	62
2.4. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale	62
3. L'acceptation située : prendre en compte l'expérience réelle avec la technologie.....	64
3.1. La prise en compte de l'usage réel et du contexte d'usage : les théories de l'activité et les théories de l'action.....	64
3.2. La prise en compte de la construction du sens des usages : l'appropriation technologique	69
3.3. Les dimensions prises en compte dans l'acceptation située	71
3.3.1. La dimension individuelle (ou personnelle)	72
3.3.2. La dimension organisationnelle (ou méta-personnelle).....	72
3.3.3. La dimension relationnelle (ou interpersonnelle)	73
3.3.4. La dimension professionnelle et identitaire (ou transpersonnelle)	73
3.4. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptation située	74
3.5. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptation située	74
4. Articulation des trois approches théoriques de l'acceptabilité des technologies.....	75
5. Quid de la résistance à la technologie, du rejet et du non-usage ?	76
<i>Chapitre 4. L'acceptabilité de la réalité virtuelle</i>	<i>81</i>
1. Les principaux domaines d'application de la réalité virtuelle et les principaux objectifs de l'évaluation de son acceptabilité	81
2. Les dispositifs évalués	83
3. Les modèles mobilisés et les dimensions considérées.....	83
3.1. Les modèles d'acceptabilité des technologies mobilisés et leurs dimensions intrinsèques	83
3.2. Les dimensions considérées dans les évaluations de l'acceptabilité sans mobilisation de modèle spécifique.....	85
4. L'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie	87

5. Apports et limites des études antérieures conduites sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle...	89
<i>Conclusion de l'état de l'art</i>	91
Partie II. Problématique	93
Partie III. Études sur l'acceptabilité et l'acceptation de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique	97
<i>Chapitre 1. Étude 1 : Projet de modification de postes d'assemblage</i>	100
1. Objectifs	100
2. Éléments de contexte	100
3. Méthodologie	101
3.1. Recueil des données	102
3.1.1. Entretiens semi-directifs	102
3.1.2. Observations filmées des sessions en réalité virtuelle	103
3.2. Méthodes de traitement des données	107
3.2.1. Analyse thématique des entretiens	107
3.2.2. Codage des vidéos des sessions en réalité virtuelle	108
3.2.3. Recueil des dysfonctionnements et des difficultés de manipulation	109
3.2.4. Analyse des communications lors des sessions en réalité virtuelle	110
4. Résultats	111
4.1. Attentes des préparateurs <i>a priori</i> des sessions en réalité virtuelle	111
4.2. Perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle	112
4.2.1. Utilité de la réalité virtuelle	113
4.2.2. Caractéristiques de la réalité virtuelle	114
4.2.3. Manques de la réalité virtuelle dans la revue de projet	114
4.2.4. Comparaison de la réalité virtuelle avec d'autres outils	115
4.2.5. Communication autour de la réalité virtuelle à Stelia	115
4.2.6. Intentions d'usage de la réalité virtuelle dans un projet de conception	116
4.3. Usage réel de la réalité virtuelle pour la revue de projet	116
4.3.1. Comportement des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle	116
4.3.2. Dysfonctionnements et difficultés de manipulation	117
4.3.3. Communications lors des sessions en réalité virtuelle	120
5. Discussion	123
5.1. Deux sessions qui se distinguent par leurs utilisateurs et leur contenu	123
5.2. Discussion des principaux résultats : facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie	124
5.2.1. Facteurs d'acceptation identifiés dans les perceptions des utilisateurs : utilité perçue et caractéristiques de la technologie jugées positivement	125
5.2.2. Facteurs de rejet identifiés dans les perceptions des utilisateurs : manques, caractéristiques de la technologie jugées négativement et manque de communication	127
5.2.3. Facteurs d'acceptation identifiés dans l'usage : support à l'activité de conception et pouvoir donné aux compagnons	130

5.2.4. Facteur de rejet identifié dans l'usage : dysfonctionnements et erreurs de manipulation ...	131
5.3. Limites de l'étude.....	131
<i>Chapitre 2. Étude 2 : Projet de nouveaux postes d'assemblage</i>	134
1. Objectifs.....	135
2. Éléments de contexte	135
3. Méthodologie	136
3.1. Recueil des données	136
3.1.1. Entretiens semi-directifs	136
3.1.2. Observations filmées des sessions en réalité virtuelle	137
3.2. Méthodes de traitement des données	139
3.2.1. Analyse thématique des entretiens.....	139
3.2.2. Codage des vidéos des sessions en réalité virtuelle.....	139
3.2.3. Recueil des dysfonctionnements et des difficultés de manipulation.....	140
3.2.4. Analyse des communications lors des sessions en réalité virtuelle	140
4. Résultats.....	141
4.1. Attentes du chargé d'affaires <i>a priori</i> des sessions en réalité virtuelle	141
4.2. Perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle	143
4.2.1. Utilité de la réalité virtuelle dans les projets	144
4.2.2. Avantages de la réalité virtuelle en comparaison avec la CAO.....	145
4.2.3. Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement	146
4.2.4. Limites de la réalité virtuelle dans les projets.....	147
4.2.5. Comparaison entre visio-casque et CAVE.....	150
4.2.6. Critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception	151
4.3. Usage réel de la réalité virtuelle pour la revue de projet.....	152
4.3.1. Comportement des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle	152
4.3.2. Dysfonctionnements et difficultés de manipulation	153
4.3.3. Communications lors des sessions en réalité virtuelle.....	154
5. Discussion	156
5.1. Deux sessions en réalité virtuelle sur des postes et avec des dispositifs différents, mais relativement proches dans leurs contenus	156
5.2. Discussion des principaux résultats.....	157
5.2.1. Facteurs d'acceptation identifiés dans les perceptions des utilisateurs	157
5.2.2. Facteurs de rejet identifiés dans les perceptions des utilisateurs.	159
5.2.3. Facteurs d'acceptation identifiés dans l'usage	161
5.2.4. Facteurs de rejet identifiés dans l'usage	162
5.3. Limites de cette étude.....	162
<i>Chapitre 3. Étude 3 : Perceptions de non-utilisateurs sur la réalité virtuelle</i>	165
1. Objectifs.....	165
2. Méthodologie	165

2.1. Recueil des données	166
2.1.1. Entretiens semi-directifs	166
2.2. Méthodes de traitement des données	169
2.2.1. Analyse thématique des entretiens.....	169
3. Résultats.....	169
3.1. Connaissances sur la réalité virtuelle : des expériences antérieures qui varient et peu d'informations sur la réalité virtuelle dans l'entreprise	170
3.2. Utilité de la réalité virtuelle : réponses à des besoins et bénéfiques sur les outils utilisés aujourd'hui	171
3.3. Qualités de la réalité virtuelle pour les non-utilisateurs : réalisme et présence, et une technologie vue comme impressionnante et fun.....	172
3.4. Changements envisagés avec l'utilisation de la réalité virtuelle : les sessions en réalité virtuelle comme une étude complémentaire	173
3.5. Organisation des sessions : différents métiers à convier.....	173
3.6. Critères de décision pour le recours à la réalité virtuelle : projets nouveaux, complexes, et de grande ampleur, mais aussi une décision stratégique.....	174
3.7. Inutilité de la réalité virtuelle : pas toujours pertinente dans le travail des non-utilisateurs	174
3.8. Freins à l'utilisation de la réalité virtuelle : défauts de la technologie et freins relatifs à la conduite des projets	175
4. Discussion	176
4.1. Peu de connaissances sur la réalité virtuelle.....	176
4.2. Deux formes de non-usage : manque d'intérêt et adoption tardive	177
4.3. Freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets.....	179
4.4. Perceptions positives des qualités de la réalité virtuelle	179
4.5. Limites de l'étude.....	180
<i>Chapitre 4. Étude 4 : Perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle</i>	<i>183</i>
1. Objectifs.....	183
2. Méthodologie	183
2.1. Recueil des données	183
2.1.1. Entretiens semi-directifs	183
2.2. Méthodes de traitement des données	184
2.2.1. Analyse thématique des entretiens.....	184
3. Résultats.....	185
3.1. Utilité et bénéfiques	185
3.2. Comparaison CAVE et visio-casque.....	186
3.3. Projets antérieurs et communication	187
3.4. Freins à l'intégration de la réalité virtuelle selon les chargés de réalité virtuelle.....	188
3.5. Évolutions de la technologie et de ses usages	188
4. Discussion	189
<i>Chapitre 5. Étude 5 : Proposition et validation expérimentale d'un modèle de l'acceptabilité en réalité virtuelle pour la formation à une tâche de rivetage dans l'industrie aéronautique</i>	<i>193</i>

1. Introduction	193
2. Objectifs	194
3. Hypothèses	194
3.1. Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 1989)	194
3.2. Modèle de l'expérience utilisateur (UX) (Hassenzahl, 2003, 2008)	195
3.3. Dimensions propres à la réalité virtuelle : mal des environnements virtuels et présence	196
3.4. Caractéristiques des utilisateurs : technophilie et propension à l'immersion	197
4. Méthode	198
4.1. Participants	198
4.1.1. Présentation générale des participants	198
4.1.2. Présentation des deux groupes de participants : visio-casque et CAVE	200
4.2. Tâche réalisée en réalité virtuelle	201
4.3. Données recueillies	203
4.4. Procédure	203
5. Résultats	204
5.1. Modélisation par équations structurelles de type PLS (<i>Partial Least Squares</i>)	204
5.2. Modèle de mesure	206
5.3. Modèle structurel : test du modèle d'acceptabilité de la réalité virtuelle proposé	214
6. Discussion	215
Partie IV. Discussion générale	221
1. Apports théoriques	221
1.1. Perceptions des utilisateurs et des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle : rôle central de l'utilité perçue	221
1.2. Utilisation réelle de la réalité virtuelle dans des revues de projet : l'environnement virtuel comme un objet intermédiaire de conception	222
1.3. Importance relative des perceptions des utilisateurs sur les caractéristiques de la réalité virtuelle	223
1.4. Une acceptation dépendante de l'intégration des sessions ainsi que des dispositifs et des logiciels utilisés	223
1.5. Intérêt de l'étude du non-usage de la réalité virtuelle	224
1.6. Questionnement des frontières entre les concepts d'acceptabilité pratique, d'acceptabilité sociale et d'acceptation située	225
1.7. Questionnement sur l'identification des facteurs d'acceptation et de facteurs de rejet d'une technologie	225
1.8. Questionnement sur les nuances de l'utilisation effective dans des sessions collectives avec la réalité virtuelle	226
2. Apports méthodologiques	227
2.1. Intérêt des entretiens pour étudier l'acceptabilité et l'acceptation des technologies	227
2.2. Intérêt des observations de situations réelles d'utilisation pour étudier l'acceptation des technologies	227
2.3. Grille d'analyse de l'utilisation de deux dispositifs de réalité virtuelle lors de revues de conception	228

2.4. Grille d'analyse des communications lors des revues de projet avec réalité virtuelle.....	229
3. Implications pratiques	230
3.1. Recommandations sur la conception des systèmes de réalité virtuelle	230
3.2. Recommandations sur l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets	230
4. Limites et perspectives de recherche.....	231
5. Apports de l'ergonomie à la question de l'acceptabilité de la réalité virtuelle à différentes phases de son implantation	232
Bibliographie	235
Annexes	261
Annexe 1 : Guide d'entretien pour les utilisateurs de la réalité virtuelle	261
Annexe 2 : Grille de codage des communications lors des sessions en réalité virtuelle.....	262
Annexe 3 : Guide d'entretien pour les non-utilisateurs	267
Annexe 4 : Guide d'entretien pour les chargés de réalité virtuelle	269

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma de référence en réalité virtuelle (Fuchs, Moreau, et al., 2006, p. 13)	9
Figure 2. Taxonomie des systèmes de réalité virtuelle, adaptée de Muhanna (2015, p. 349)	11
Figure 3. Continuum acceptabilité-acceptation (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009)	41
Figure 4. Modèle de l'acceptabilité de Nielsen (1993), traduction de Tricot et al. (2003)	43
Figure 5. Modèle P3 (Pouvoir, Perceptions, Performance) de Dillon & Morris (1999), notre traduction	44
Figure 6. Le modèle des composantes de l'expérience utilisateur (CUE) (adapté de Mahlke, 2008)	46
Figure 7. Éléments centraux de l'expérience utilisateur du point de vue de concepteur et de l'utilisateur (adapté de Hassenzahl, 2003)	46
Figure 8. Modèle du succès des technologies de DeLone & McLean (1992)	51
Figure 9. Modèle du succès des technologies révisé (DeLone & McLean, 2003)	51
Figure 10. Théorie de la disconfirmation des attentes, adaptée aux technologies (Bhattacharjee, 2001)	52
Figure 11. Théorie de l'Action Raisonnée (Fishbein & Ajzen, 1975)	53
Figure 12. Théorie du Comportement Planifié (Ajzen, 1991)	54
Figure 13. Modèle de l'acceptabilité des technologies (TAM, Technology Acceptance Model) (Davis, 1989)	54
Figure 14. Modèle de l'acceptabilité des technologies 2 (TAM2) (Venkatesh & Davis, 2000)	56
Figure 15. Modèle d'acceptabilité des technologies 3 (TAM3) (Venkatesh & Bala, 2008)	58
Figure 16. Modèle unifié de l'acceptabilité et de l'usage des technologies (UTAUT) (Venkatesh et al., 2003)	60
Figure 17. Modèle unifié de l'acceptabilité et de l'usage des technologies (UTAUT2) (Venkatesh et al., 2012)	61
Figure 18. Médiation de la relation sujet-objet par un artefact, selon Vygotski (1997)	65
Figure 19. Structure hiérarchique de l'activité, adaptée et traduite de Kaptelinin & Nardi (2006, p. 64)	66
Figure 20. Structure d'un système d'activité, traduit de Engeström (1987, p. 78)	67
Figure 21. CAVE, sans environnement virtuel pour des questions de secret industriel.	104
Figure 22. Lunettes Edge VR à 3D active de marque Volfoni. Photographie reproduite avec autorisation de Volfoni Group	104

Figure 23. Flystick 2 de marque ART. Photographie reproduite avec autorisation de ART GmbH.	105
Figure 24. Interface de The Observer lors du visionnage et codage des vidéos. (La vidéo montrée sert d'exemple et n'appartient pas à cette étude).	108
Figure 25. Synthèse des perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle	113
Figure 26. Fonctionnalités utilisées lors de la première session en RV	117
Figure 27. Fonctionnalités utilisées lors de la seconde session en RV	117
Figure 28. Répartition des catégories de communications lors deux sessions	120
Figure 29. Répartition des catégories de communications pour la session 1	121
Figure 30. Répartition des catégories de communications pour la session 2	121
Figure 31. Synthèse des perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle	143
Figure 32. Fonctionnalités utilisées lors de la première session	153
Figure 33. Fonctionnalités utilisées lors de la seconde session	153
Figure 34. Répartition des catégories de communications lors des deux sessions combinées.....	155
Figure 35. Répartition des catégories de communications lors de la première session	155
Figure 36. Synthèse des perceptions des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle	170
Figure 37. Synthèse des perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle.....	185
Figure 38. Modèle proposé de l'acceptabilité de la réalité virtuelle	198
Figure 39. Capture de la phase d'entraînement.....	202
Figure 40. Capture d'écran du tableau	203
Figure 41. Modèle structurel évalué de l'acceptabilité de la réalité virtuelle	215

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Profil des symptômes du mal des transports, du mal des simulateurs et du mal des environnements virtuels (adapté de Rebenitsch & Owen, 2016)	35
Tableau 2. Synthèse des dimensions étudiées en ergonomie dans l'interaction homme-réalité virtuelle et des méthodes employées	39
Tableau 3. Synthèse de la problématique (versant de l'acceptabilité étudié, objectifs et approches de l'acceptabilité mobilisées)	96
Tableau 4. Phase du processus d'acceptabilité étudié, participants et lieux des quatre études menées.....	98
Tableau 5. Caractéristiques des personnes interviewées lors de l'étude 1	103
Tableau 6. Participants à la première session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette	106
Tableau 7. Participants à la seconde session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette	106
Tableau 8. Grille de codage des sessions en réalité virtuelle	109
Tableau 9. Dysfonctionnements relevés lors des deux sessions en réalité virtuelle	119
Tableau 10. Difficultés de manipulation relevées lors des deux sessions en réalité virtuelle.....	119
Tableau 11. Facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle identifiés dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie.....	125
Tableau 12. Caractéristiques des personnes interviewées	136
Tableau 13. Participants à la première session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette	138
Tableau 14. Participants à la seconde session en réalité virtuelle, temps passé à porter le visio-casque et postes traités	139
Tableau 15. Grille de codage de la session en réalité virtuelle avec visio-casque ..	140
Tableau 16. Besoins évoqués par les utilisateurs.....	144
Tableau 17. Avantages de la réalité virtuelle par comparaison à la CAO	146
Tableau 18. Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement	146
Tableau 19. Défauts de la technologie	147
Tableau 20. Freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception	148
Tableau 21. Besoins pour les sessions futures.....	149
Tableau 22. Points de comparaison entre le visio-casque et le CAVE.....	150
Tableau 23. Critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception.....	151
Tableau 24. Dysfonctionnements relevés lors des deux sessions en réalité virtuelle	154

Tableau 25. Difficultés de manipulation relevées lors des deux sessions en réalité virtuelle.....	154
Tableau 26. Facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle identifiés dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie.....	157
Tableau 27. Caractéristiques des personnes interviewées	167
Tableau 28. Utilisation par les personnes interviewées du logiciel CATIA® (logiciel de CAO).....	168
Tableau 29. Caractéristiques des personnes interviewées	184
Tableau 30. Répartition des participants selon leur lieu d'étude et leur filière	199
Tableau 31. Participants jouant aux jeux vidéo et utilisant des logiciels 3D de manière hebdomadaire (une ou plusieurs fois par semaine)	199
Tableau 32. Répartition des participants dans le groupe « CAVE » et dans le groupe « visiocasque »	200
Tableau 33. Répartition du genre des participants dans les deux groupes expérimentaux.....	200
Tableau 34. Répartition des filières d'étude des participants selon leur groupe expérimental	201
Tableau 35. Outils utilisés (originaux et traductions françaises)	203
Tableau 36. Fiabilité et validité convergente.....	208
Tableau 37. Validité discriminante.....	210
Tableau 38. Poids, saturation et significativité des construits de premier-ordre.....	213
Tableau 39. Valeurs des VIF (Variable Inflation Score) pour les différents construits de premier-ordre	213
Tableau 40. Corrélations entre les construits de second-ordre et les autres construits du modèle	213
Tableau 41. Résultats du modèle structurel	214

LISTE DES SYNTHÈSES

Synthèse du chapitre 1	17
Synthèse du chapitre 2	39
Synthèse du chapitre 3	79
Synthèse du chapitre 4	90
Synthèse de l'étude 1	133
Synthèse de l'étude 2	163
Synthèse de l'étude 3	182
Synthèse de l'étude 4	192
Synthèse de l'étude 5	218

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En 2015, le gouvernement français a lancé le projet « Industrie du Futur », dont un des axes vise à développer l'équipement technologique des industries françaises. Dans ce cadre, 47 technologies ont été identifiées comme des technologies d'avenir, pour lesquelles on recommande un investissement financier des entreprises, mais aussi une implication de la recherche académique et industrielle. La réalité virtuelle, et plus globalement les technologies immersives, font partie de ces 47 technologies, aux côtés de la robotique, de l'intelligence artificielle, ou encore de l'internet des objets. Le rapport Technologies Clé 2020 prête à la réalité virtuelle un « fort potentiel industriel pour la modélisation, la conception, les simulations ou encore la formation » (Direction Générale des Entreprises, 2016, p. 340). Par ailleurs, cette initiative politique s'inscrit dans un contexte dans lequel la réalité virtuelle devient plus facile à implanter en entreprise, d'abord, parce que les coûts des visio-casques ont fortement chuté, mais aussi, parce que certains verrous technologiques ont été levés (Slater, 2018). En effet, les casques accessibles au grand public sont maintenant plus performants, plus confortables et ils nécessitent moins de moyens matériels et logiciels (certains casques fonctionnent sans être reliés à un ordinateur et de nombreuses applications en réalité virtuelle sont proposées à la vente).

Pourtant, pour que l'implantation de la réalité virtuelle présente des bénéfices pour les entreprises, encore faut-il que les utilisateurs l'utilisent. C'est de cette question que traite cette thèse et le projet LEON¹ dans lequel elle s'inscrit. L'acceptabilité de la réalité virtuelle et des environnements virtuels dans des contextes professionnels n'est pas une problématique nouvelle. Des études ont été menées notamment dans des contextes de formation, par exemple sur les perceptions des utilisateurs à son égard pour des procédures médicales (Chow, Herold, Choo, & Chan, 2012), ou encore pour le soudage de châssis de camion (Ordaz, Romero, Gorecky, & Siller, 2015). Toutefois, ces études traitent uniquement des perceptions des utilisateurs et n'intègrent pas d'analyses de situations réelles d'utilisation. De plus, à notre connaissance, peu d'études ont été menées sur cette question dans des situations réelles de revues de projet (Benne, 2013; Berg & Vance, 2017a; Y. Liu, Lather, & Messner, 2014; Wolfartsberger, 2019). Les études donnent donc peu d'informations sur l'adoption ou sur le rejet de la réalité virtuelle dans l'industrie, alors que les entreprises ont commencé à l'implanter (ou l'envisagent) dans le cadre de l'usine du futur.

L'objectif de cette thèse est d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle en situation réelle de travail dans un secteur particulier : celui de l'industrie aéronautique. Nous avons traité l'acceptation de la réalité virtuelle en deux versants : d'une part, selon les perceptions des utilisateurs à son égard ainsi que leurs intentions (ou non) de l'utiliser et, d'autre part, selon leur utilisation réelle de la technologie. Deux phases du processus d'acceptabilité ont été étudiées : son *acceptation*, dans des situations de revues de projet lors de la conception de postes de fabrication d'avions ; et son *acceptabilité*, auprès de non-utilisateurs également

¹ Le projet LEON (Acceptabilité des technologies émergentes dans l'industrie aéronautique) est un projet financé par la Région Hauts-de-France et l'Union Européenne dans le cadre du FEDER. Il repose sur un partenariat entre le CRP-CPO (Centre de Recherche en Psychologie : Cognition Psychisme et Organisation, EA 7273) de l'Université de Picardie Jules Verne, dans lequel s'inscrit cette thèse, l'équipe Heudiasyc (Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes, UMR CNRS 7253) de l'Université Technologique de Compiègne (UTC) et Stelia Aerospace.

pour des revues de projet, et auprès de potentiels futurs utilisateurs pour la formation à l'assemblage aéronautique.

Ce manuscrit est structuré en quatre parties. Nous présentons dans une première partie un état de l'art sur la réalité virtuelle et sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Cette partie se compose de quatre chapitres. Le premier chapitre porte sur la réalité virtuelle et ses applications. Le deuxième chapitre traite des concepts centraux dans l'étude de l'interaction entre l'homme et la réalité virtuelle. Le troisième chapitre résume les principales approches de l'acceptabilité des technologies. Le dernier chapitre porte sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle.

Notre deuxième partie est consacrée à la présentation de notre problématique de recherche.

La troisième partie du manuscrit présente les contributions empiriques de cette thèse. Nous y présentons cinq études, en cinq chapitres. Les deux premiers chapitres sont des études sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans des projets de postes de fabrication d'avions. Le troisième chapitre porte sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle pour des non-utilisateurs, et le quatrième chapitre pour les chargés de réalité virtuelle d'un site de l'entreprise. Le cinquième chapitre présente une étude expérimentale sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle pour la formation à l'assemblage aéronautique.

Enfin, la quatrième partie de ce manuscrit discutera des apports théoriques et méthodologiques de cette thèse, avant d'en présenter les limites et d'en extraire des perspectives de recherche.

PARTIE I. CADRE THÉORIQUE

CHAPITRE 1. LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET SES APPLICATIONS

1. QUELQUES ÉLÉMENTS DE DÉFINITION

1.1. Les termes de « réalité virtuelle »

Les termes de « réalité virtuelle » sont adaptés de l'expression anglaise *virtual reality*, dont on attribue l'origine à Jaron Lanier en 1989, alors chef de la direction de VPL Research Inc., un fabricant de matériel informatique utilisé pour des applications en réalité virtuelle (gants, lunettes...) (Steuer, 1992). L'expression française est une traduction littérale de l'expression anglaise. Toutefois, ce choix de terminologie ne rend pas compte de certaines subtilités de l'expression anglaise. En effet, en anglais, l'adjectif *virtual* peut être traduit par « presque ». L'expression *virtual reality* renvoie donc à une idée de quasi-réalité, alors qu'en français l'expression de « réalité virtuelle » est de l'ordre de l'oxymore. On aurait donc pu lui préférer en français des expressions telles que « tenant lieu de réalité », de « réalité vicariante » ou « d'environnement vicariant », pour exprimer l'idée d'une réalité / d'un environnement qui se supplée au monde réel (Fuchs, Berthoz, & Vercher, 2006).

Au-delà du croisement de ces deux mots – « réalité » et « virtuelle » – il nous semble essentiel de donner une définition opérationnelle de la réalité virtuelle, d'autant plus que l'image véhiculée par les médias établit un raccourci entre l'utilisation de certains dispositifs et la réalité virtuelle. On considère par exemple qu'il suffit de porter un visio-casque pour qu'on puisse parler de réalité virtuelle, alors que le dispositif peut être uniquement utilisé comme un dispositif d'affichage sans que l'utilisateur ne soit véritablement actif dans l'environnement virtuel qu'il observe.

Nous éviterons par conséquent les définitions basées sur les dispositifs, qui sont réductrices pour plusieurs raisons (Steuer, 1992). Premièrement, ce type de définitions sous-entend que l'on pourrait facilement dresser deux catégories de systèmes et placer arbitrairement dans l'une ou dans l'autre de ces catégories les systèmes qui relèvent de la réalité virtuelle et ceux qui n'en sont pas. Ce serait alors l'utilisation de certains dispositifs qui détermineraient l'appartenance d'un système à l'une ou l'autre de ces catégories. Néanmoins, de cette façon, on occulterait totalement la variété des systèmes et la manière dont ils peuvent varier selon différentes dimensions (degré d'immersion, dispositifs d'interaction mobilisés, etc.). Par ailleurs, ces définitions sont également dépendantes des évolutions technologiques, dont la rapidité pourrait obliger à adapter sans cesse sur les terminologies.

Nous écartons également les définitions de la réalité virtuelle qui mélangent ses finalités, ses applications, ses fonctions et les techniques sur lesquelles elle repose (Fuchs, Berthoz, et al., 2006). Afin d'éviter ces confusions et d'éclaircir ce qu'on entend lorsque l'on parle de réalité virtuelle, nous reprendrons ici les différents niveaux de définitions proposés par Fuchs, Berthoz, et Vercher (2006). Nous commençons par une définition de la finalité de la réalité virtuelle, puis nous présenterons ses fonctionnalités potentielles. Nous finirons sur une définition technique de la réalité virtuelle.

1.2. La finalité de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle peut être définie par l'intermédiaire de ses objectifs. Pour Fuchs, Berthoz, et Vercher (2006), la finalité de la réalité virtuelle est « de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel » (p. 5).

La première partie de cette définition pose l'activité de l'utilisateur dans un environnement virtuel comme sensori-motrice et cognitive. En effet, on parle d'activité sensori-motrice, car l'utilisateur est immergé dans l'environnement virtuel par le biais de différents canaux sensoriels (vue, ouïe, proprioception, etc.) et qu'il a une activité motrice pour agir sur l'environnement, par exemple en marchant dans la pièce ou en pressant des boutons sur une manette. Les actions de l'utilisateur ont des conséquences sensorielles. Son activité est également cognitive : il traite par exemple les informations données par le système sur sa position pour prendre la décision de se déplacer à nouveau, ou de saisir un objet.

La seconde partie de cette définition introduit différentes catégories d'environnements virtuels ; ils peuvent être imaginaires, symboliques, ou il peut s'agir de simulations de certains aspects du monde réel. Certains environnements virtuels représentent des mondes imaginaires, comme ce peut être le cas dans certains jeux vidéo, où l'on cherche à plonger le joueur dans un monde différent du sien. D'autres proposent des représentations symboliques du monde, dans le sens où ils permettent de visualiser des éléments du monde réel qui ne sont habituellement pas visibles par l'être humain. Par exemple, ces environnements virtuels permettent à des apprenants de construire des molécules avec des retours haptiques (Ucar, Ustunel, Civelek, & Umut, 2017) ou encore de manipuler de l'ADN (Lamb, Antonenko, Etopio, & Seccia, 2018). Enfin, certains environnements virtuels permettent de simuler *certaines aspects* du monde réel. En effet, on se représente à tort les environnements virtuels comme des pâles copies du monde réel, qu'ils doivent chercher à reproduire le plus fidèlement possible. Toutefois – et c'est là l'intérêt de ce type de technologies – leur but n'est pas de remplacer le monde réel, mais d'en exploiter certains aspects pour répondre à différents objectifs. Par exemple, lorsque la réalité virtuelle est utilisée dans des revues de projet en industrie, il est intéressant d'avoir une visualisation détaillée du futur poste que l'on souhaite évaluer. Néanmoins, il n'est pas forcément nécessaire de représenter en détail les postes environnants, les bruits de l'atelier ou encore le passage des chariots d'approvisionnement de pièces. Pour ce type d'environnements, le niveau de fidélité à atteindre dépendra des objectifs de l'application.

1.3. Une définition fonctionnelle de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle peut également être définie selon ses fonctionnalités potentielles. Elle permet de « s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de temps, de lieu et (ou) de type d'interaction : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique » (Fuchs, Berthoz, et al., 2006, p. 7).

La réalité virtuelle permet donc de s'extraire des lois physiques de notre monde. La notion de temps est différente en réalité virtuelle puisqu'il est possible de l'arrêter lorsque l'on effectue une action, de revenir en arrière ou encore de l'accélérer. De la même manière, l'utilisateur change virtuellement de lieu : il a l'impression de se trouver dans l'environnement virtuel dans lequel il est immergé plus que dans le

monde physique dans lequel il utilise le système (nous reviendrons plus tard dans cet état de l'art sur ce phénomène que l'on peut expliquer par les notions d'immersion et de présence). L'interaction est également différente puisqu'elle répond aux règles et aux fonctionnements de l'application, qui sont différents de celles du monde physique. Par exemple, les déplacements peuvent s'effectuer avec une manette plutôt qu'en se déplaçant effectivement dans le monde physique.

Les deux premières définitions de la réalité virtuelle que nous venons de donner en termes de finalité et de fonctionnalités mettent en évidence deux notions qui sont centrales et consensuelles dans les définitions de la réalité virtuelle : *l'immersion* et *l'interaction* (Fuchs, Berthoz, et al., 2006). Pour qu'une expérience soit qualifiée d'expérience en réalité virtuelle, il est nécessaire qu'elle remplisse ces deux conditions. En d'autres termes, on conçoit que dans une expérience en réalité virtuelle, un utilisateur est en *immersion* dans un environnement virtuel sur lequel il peut *interagir* (en temps réel).

On retrouve ces deux conditions dans bon nombre de définitions de la réalité virtuelle (Muhanna, 2015). Par exemple, la réalité virtuelle a été définie comme une expérience *immersive* et *interactive* générée par un ordinateur (Pimentel & Teixeira, 1994) ou encore, comme la combinaison d'un environnement virtuel, d'un environnement physique, ainsi que des interfaces logicielles et matérielles qui permettent l'interaction entre un humain et un ordinateur (Zhao, 2002, cité par Muhanna, 2015).

1.4. Une définition technique de la réalité virtuelle

Parmi l'ensemble des définitions données, nous nous attarderons sur le troisième niveau de définition proposé par Fuchs, Berthoz et Vercher (2006) dans le *Traité de la Réalité Virtuelle*. D'un point de vue technique, la réalité virtuelle y est définie comme :

Un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique (1) et des interfaces comportementales (2) en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle (3) par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs (Fuchs, Moreau, Berthoz, & Vercher, 2006, p. 8).

Certains aspects de cette définition peuvent être complétés :

- (1) *Par informatique*, on entend l'ensemble du matériel (*hardware*) et les logiciels (*software*) du système. Il est nécessaire de mobiliser l'informatique pour concevoir un environnement virtuel interactif. Cela nécessite que l'environnement virtuel (ses objets, ses personnages, etc.) réagisse en temps réel en suivant des lois physiques (mécaniques, optiques, acoustiques, etc.) et des lois comportementales (psychologiques, sociales, affectives, etc.).
- (2) *Les interfaces comportementales* sont des interfaces matérielles de trois types :
 - *les interfaces sensorielles*, qui informent l'utilisateur « par ses sens » de modifications de l'environnement virtuel. Par exemple, après une action effectuée par l'utilisateur, un feedback peut lui être donné par un changement de couleur, un son, ou une vibration.
 - *les interfaces motrices*, qui informent l'ordinateur des actions motrices de l'utilisateur. Par exemple, le système peut exploiter des données sur la position

de l'utilisateur dans une salle immersive, ou sur le geste qu'il est en train d'effectuer avec une manette.

- *les interfaces sensori-motrices*, qui informent à la fois le système informatique et l'utilisateur. Par exemple, un bras haptique peut renseigner le système informatique sur le geste qu'effectue l'utilisateur tout en obligeant ce dernier à effectuer des efforts pour simuler la résistance de la pièce qu'il perce.
- (3) Enfin, on dit de l'utilisateur qu'il est en *immersion pseudo-naturelle*, car il n'agit pas dans le monde virtuel comme il agirait *naturellement* dans le monde réel. Des biais sensori-moteurs sont en effet créés : l'utilisateur peut par exemple se servir d'une manette au lieu de marcher, et le système peut ne donner que des informations visuelles et sonores. C'est pourquoi on parle d'immersion « pseudo » naturelle.

2. LE MODÈLE DE RÉFÉRENCE EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Fuchs et al. (2006) proposent un modèle général de la réalité virtuelle qui distingue trois niveaux d'immersion et d'interaction (Figure 1). Le premier niveau est celui de l'immersion et de l'interaction sensori-motrices. Il concerne le fait que l'ordinateur est physiquement relié à l'utilisateur à travers ses sens et ses réponses motrices. Le second niveau est celui de l'immersion et de l'interaction cognitives. L'utilisateur doit être mentalement immergé dans l'environnement virtuel et l'appareillage avec les systèmes informatiques doit lui être transparent. Le troisième niveau est le niveau d'immersion et d'interaction fonctionnelles. Il concerne les activités que doit réaliser l'utilisateur dans l'environnement virtuel.

Pour les auteurs, les activités du sujet sont décomposables en comportements de base qu'ils qualifient de « Primitives Comportementales Virtuelles ». Ils en distinguent quatre :

- observer le monde virtuel ;
- se déplacer dans le monde virtuel ;
- agir sur le monde virtuel ;
- communiquer avec autrui ou avec l'application.

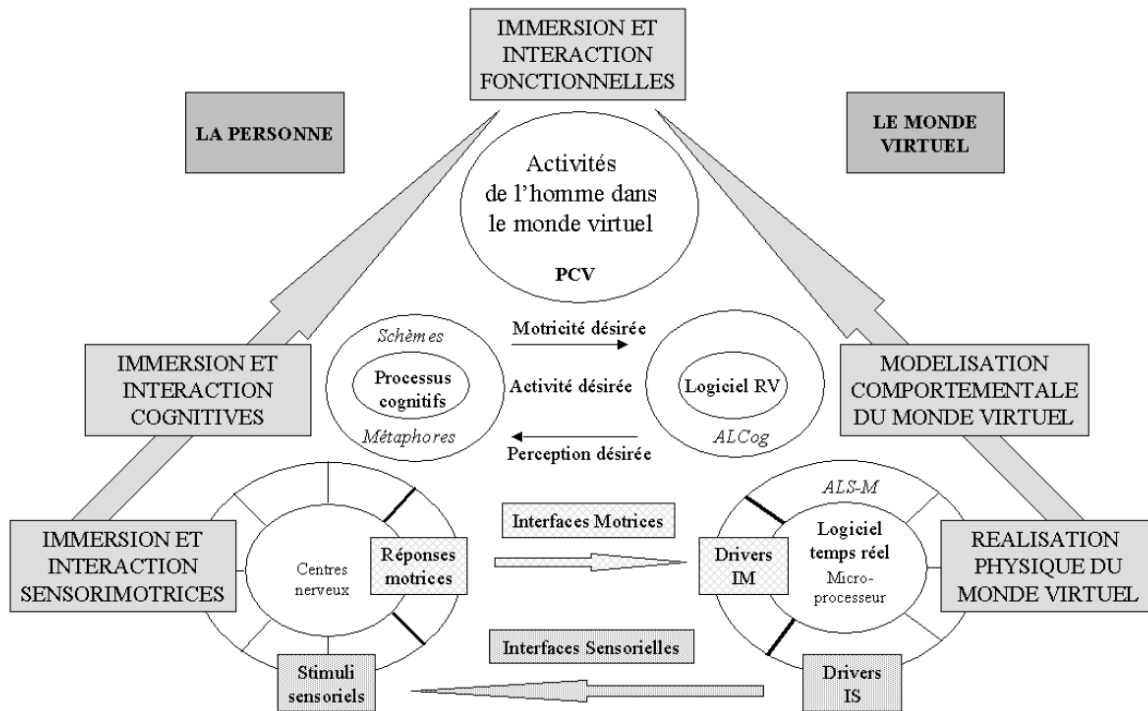


Figure 1. Schéma de référence en réalité virtuelle (Fuchs, Moreau, et al., 2006, p. 13)

En plus de ces trois niveaux d'immersion et d'interaction, ce modèle en réalité virtuelle comprend un découpage transversal. On trouve, d'une part, les composants des différents niveaux pour l'utilisateur et, d'autre part, les composants des différents niveaux pour le monde virtuel. Au premier niveau, l'ordinateur doit gérer le logiciel en temps réel qui permet la réalisation physique du monde virtuel, en se basant sur les lois physiques (mécaniques, optiques, etc.) agissant sur les objets et sur les êtres animés. La réalisation physique du monde virtuel permet une immersion et une interaction sensori-motrices à l'utilisateur. De son côté, il reçoit des stimuli sensoriels par le monde virtuel et il produit des réponses motrices, là aussi traitées en temps réel par l'ordinateur. Au deuxième niveau du modèle, la partie logicielle de la réalité virtuelle doit gérer la modélisation comportementale du monde virtuel. La partie logicielle de la réalité virtuelle simule les comportements des êtres animés et facilite l'immersion et l'interaction cognitives de l'utilisateur par le biais d'Aides Logicielles Comportementales (ALC). Elles sont de deux types : les Aides Logicielles Comportementales Sensori-Motrices (ALC-SM) et les Aides Logicielles Comportementales Cognitives (ALS-Cog). Les premières peuvent supprimer les bruits des signaux de localisation, par exemple. Les secondes comprennent par exemple des effets de magnétisme pour guider les mouvements de l'utilisateur qui doit poser un objet sur une table.

Par ailleurs, il existe évidemment des boucles de rétroaction perception-cognition-action. Par exemple, un stimulus donné par la partie informatique de la réalité virtuelle peut entraîner des réponses motrices de l'utilisateur, qui à leur tour, entraînent de nouveaux stimuli sensoriels qui peuvent modifier les intentions de l'utilisateur.

Les définitions de la réalité virtuelle et le modèle de référence de l'immersion et de l'interaction que nous avons présentés nous permettent de comprendre en quoi

consiste la réalité virtuelle, quels sont ses objectifs et quelles sont les relations qui peuvent exister entre l'utilisateur et le monde virtuel. Toutefois, nous l'évoquons plus tôt, la réalité virtuelle recouvre une large diversité de technologies et d'applications. Nous en présenterons les principales dans les parties suivantes.

3. LES PRINCIPAUX DISPOSITIFS D'INTERACTION

La réalité virtuelle exploite quatre catégories de dispositifs (Burkhardt, 2003) :

- des dispositifs de présentation visuelle ;
- des dispositifs de capture de mouvement et de position ;
- des dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés ;
- des dispositifs d'entrée et de présentation sonore.

Ces dispositifs permettent à la fois l'immersion de l'utilisateur dans l'environnement virtuel et son interaction avec cet environnement. Ces interfaces peuvent être sensorielles, motrices ou sensori-motrices (Fuchs et al., 2006). Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur par ses canaux sensoriels des évolutions de l'environnement virtuel. Les interfaces motrices informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme. Les interfaces sensori-motrices gèrent ces informations dans les deux sens.

Sans chercher à être exhaustive, nous présenterons dans les sous-parties suivantes chacune des catégories de dispositifs listées plus haut. Nous en expliquerons le fonctionnement général et nous en donnerons les principales catégories.

3.1. Les dispositifs de présentation visuelle

Les dispositifs de présentation visuelle sont incontournables en réalité virtuelle. Il est rare de trouver des systèmes qui ne mobilisent pas la vision, même si l'on pourrait citer les systèmes développés à destination de personnes aveugles, qui peuvent intégrer des sons spatialisés. Les systèmes de réalité virtuelle peuvent être classés en trois catégories selon le degré d'immersion de leurs dispositifs de présentation visuelle (Mujber, Szecsi, & Hashmi, 2004) :

- *les systèmes non immersifs* (ou *desktop-VR*), qui utilisent les moniteurs des ordinateurs sans autre matériel informatique spécifique ;
- *les systèmes semi-immersifs*, qui comprennent les écrans larges ainsi que les systèmes de projection sur mur (CADwall) ;
- *les systèmes entièrement immersifs*, tels que les visio-casques et les salles immersives de type CAVE (c'est-à-dire des systèmes de visualisation cubique dont trois à six faces sont des écrans).

Les systèmes semi-immersifs et immersifs offrent une vision stéréoscopique, c'est-à-dire qu'ils permettent une vision en 3D de l'environnement virtuel en affichant une image différente pour chaque œil. Les systèmes non immersifs n'offrent pas de vision stéréoscopique et ne requièrent pas de technologies particulières. C'est sur ce dernier critère, le recours à du matériel spécifique, que Muhanna (2015) propose une taxonomie des systèmes de réalité virtuelle (Figure 2).

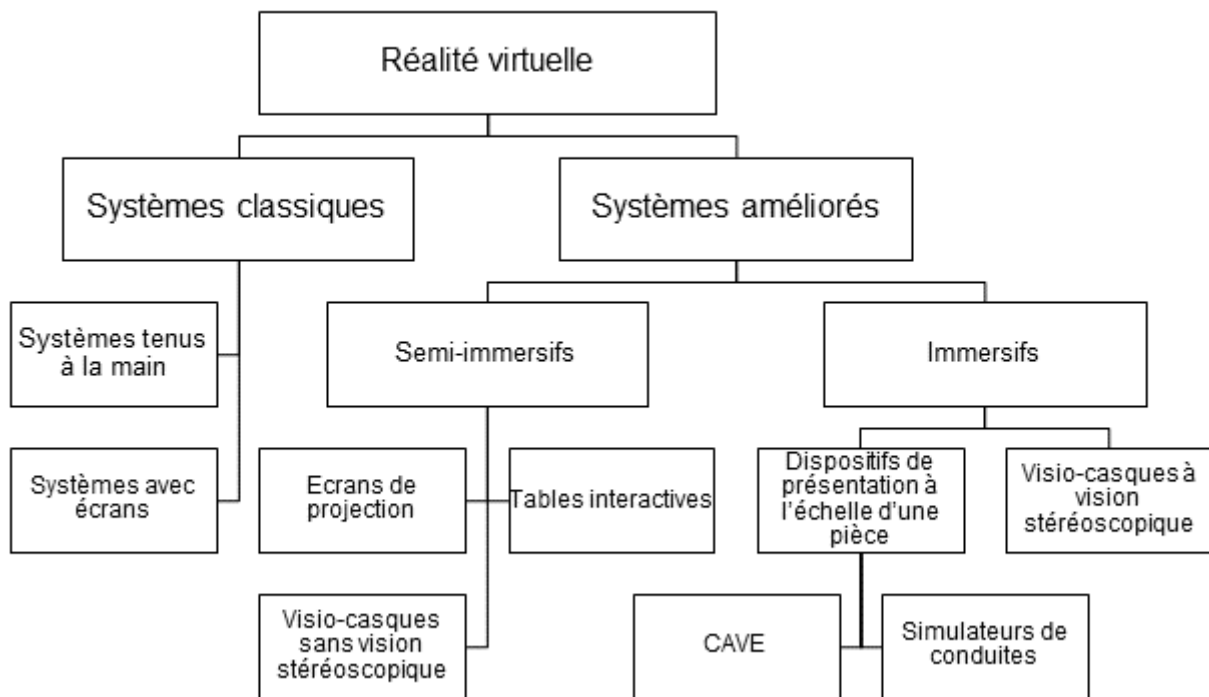


Figure 2. Taxonomie des systèmes de réalité virtuelle, adaptée de Muhanna (2015, p. 349)

Cette taxonomie distingue deux macro-catégories de systèmes : les systèmes classiques, qui n'utilisent pas de dispositifs de présentation visuelle particuliers, et les systèmes « améliorés » qui requièrent du matériel informatique particulier. Parmi la première catégorie de systèmes, on trouve les dispositifs non immersifs évoqués auparavant. Ces dispositifs fonctionnent avec des ordinateurs, mais aussi avec des dispositifs portables tels que les smartphones. La seconde catégorie de systèmes, les systèmes améliorés, comprend la réalité virtuelle semi-immersive et immersive. Les systèmes semi-immersifs comprennent les écrans de projection, les tables interactives ainsi que les visio-casques sans vision stéréoscopique. Enfin, dans la dernière catégorie de la taxonomie, on retrouve les dispositifs immersifs. Ils comprennent les visio-casques avec vision stéréoscopique, ainsi que les dispositifs de présentation visuelle à l'échelle d'une pièce, c'est-à-dire les simulateurs de conduite et les salles immersives de type CAVE.

3.2. Les dispositifs de capture de mouvement et de position

Les systèmes de réalité virtuelle comprennent également des dispositifs de capture de mouvement et de position. Ces dispositifs permettent d'informer en temps réel l'ordinateur des actions et de la position de l'utilisateur ainsi que de leurs évolutions. Les objets à localiser par les capteurs peuvent être le corps entier de l'utilisateur, une partie de son corps ou encore un objet qu'il tient à la main (Fuchs & Mathieu, 2011).

Les capteurs utilisés permettent de donner la localisation d'un objet à partir de six paramètres (liés à six degrés de liberté) : trois angles et trois distances (Fuchs & Mathieu, 2011). Ces trois paramètres sont définis par les transformations géométriques (rotation ou translation) entre le point de référence dans l'environnement et le point de référence qui est traqué.

Les capteurs les plus fréquemment utilisés en réalité virtuelle ont pour objectif de :

- localiser la tête d'un utilisateur qui porte un visio-casque ;
- localiser une main qui porte un gant de données selon les six degrés de liberté ;
- mesurer les mouvements d'une manette qui tient un objet virtuel ou qui contrôle un curseur ;
- localiser une partie du corps de l'utilisateur.

Il existe différentes catégories de capteurs : les capteurs mécaniques, les capteurs électromagnétiques et les capteurs optiques.

3.3. Les dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés

Les capteurs de retour proprioceptifs et cutanés comprennent les dispositifs à retour d'effort, les dispositifs tactiles et les dispositifs de simulation de mouvement. Les dispositifs à retour d'effort servent d'interface sensori-motrice : ils donnent des informations à l'ordinateur sur les mouvements effectués par l'utilisateur en même temps qu'ils agissent sur ces mouvements afin que l'utilisateur ressente le poids, la raideur, les frottements ou encore l'inertie des objets qu'il manipule (Gosselin & Andriot, 2006). On y retrouve les poignées, stylos et bras à retour d'effort, mais aussi les dispositifs portés, comme les exosquelettes et les gants.

Les dispositifs tactiles ont pour objectif de donner des informations à l'utilisateur sur le contact avec l'objet virtuel, sa forme locale, sa rugosité, sa texture ou encore sa température (Benali-Koudja & Hafez, 2006). Ces interfaces sont encore aujourd'hui peu développées. Elles empruntent la technologie des imprimantes matricielles et des systèmes d'affichage braille pour les non-voyants.

Gosselin et Andriot (2006) ont identifié les principaux domaines d'applications des dispositifs tactiles. Il s'agit :

- de la téléopération, où des opérations sont effectuées à distance par le biais de technologies, notamment en chirurgie ou dans des milieux hostiles ;
- de la recherche sur la perception tactile afin de modéliser l'interaction tactile d'un opérateur dans son environnement ;
- de la substitution sensorielle, où une information visuelle, auditive ou autre est traduite en une information tactile ;
- de la génération de surface 3D, qui permet de ne pas contraindre les mouvements de l'utilisateur (en lui demandant, par exemple, de ne pas placer continuellement la main sur un dispositif) ;
- des systèmes d'affichage braille ;
- des jeux.

Enfin, les dispositifs de simulation de mouvement imposent des efforts au corps de l'utilisateur pour modifier son orientation dans l'espace ou lui faire subir des accélérations (Fuchs, 2006). Ces dispositifs peuvent être classés en deux groupes : d'une part, les sièges et autres dispositifs mono utilisateur et, d'autre part, les cabines de simulation, en général multi-utilisateurs, dans lesquelles le dispositif d'affichage de l'environnement virtuel est inclus.

3.4. Les dispositifs d'entrée et de présentation sonore

Les dispositifs d'entrée sonore comprennent les dispositifs de reconnaissance vocale. Elles permettent à l'utilisateur d'interagir avec le système par des commandes vocales reconnues et traitées par l'ordinateur. Les dispositifs de présentation sonore comprennent quant à eux les interfaces logicielles et matérielles qui permettent un son spatialisé, c'est-à-dire de simuler des indices de localisation spatiale et des sources sonores en fonction de sa position souhaitée.

4. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Après une présentation du fonctionnement de la réalité virtuelle, nous proposons une synthèse de ces principales applications par le biais de quelques exemples. Le domaine d'application le plus connu de la réalité virtuelle est le loisir, et notamment le jeu vidéo. Le développement récent des visio-casques et surtout la chute de leurs prix les ont rendus accessibles au grand public. On situe en 2016 cette démocratisation des visio-casques (Gaggioli, 2017), notamment avec l'arrivée de l'Oculus Rift sur le marché et son rachat par Facebook (Cipresso, Giglioli, Raya, & Riva, 2018). Aujourd'hui, il est possible d'acheter un visio-casque moyennant 600 € pour l'Oculus Rift et l'HTC Vive et 250 € pour le Playstation VR. Les jeux vidéo proposés en réalité virtuelle sont variés : ils vont de jeux gratuits fournis avec les casques comme The Lab (qui accompagne les casques de marque HTC) à des jeux de grande envergure déjà connus des joueurs comme Fall Out 4 ou Resident Evil 7.

La réalité virtuelle est également utilisée dans le domaine de l'art. Par exemple, des artistes peignent en réalité virtuelle, ce qui a donné lieu à différentes expositions à la Royal Academy de Londres, au Tate Museum ou dans le cadre du salon de la réalité virtuelle, Laval Virtual. Par ailleurs, certains studios ont également réalisé des environnements virtuels pour faire découvrir des artistes au public comme Rembrandt (*Meeting Rembrandt: Master of Reality*) ou Van Gogh (*The Night Cafe : A VR Tribute to Vincent Van Gogh*).

Le tourisme exploite également les technologies de réalité virtuelle en proposant aux utilisateurs de visiter des destinations dans des environnements virtuels immersifs. On trouve des exemples de visites du Parc national du Lake District au Royaume-Uni (tom Dieck, tom Dieck, Jung, & Moorhouse, 2018) ou encore du cimetière des Fontanelles à Naples (Marasco, Buonincontri, van Niekerk, Orłowski, & Okumus, 2018).

Nous nous attarderons plus longuement ici sur les applications les plus courantes de la réalité virtuelle dans le monde du travail. Nous commencerons par donner des exemples généraux d'applications dans l'éducation, dans la formation, dans la conception, dans la thérapie et dans la recherche. Puis, nous nous arrêterons sur les applications de la réalité virtuelle dans le milieu industriel.

Dans l'éducation, la réalité virtuelle est utilisée comme un outil pédagogique, notamment pour l'apprentissage des sciences. On trouve des exemples d'applications à l'université pour l'apprentissage de la composition des molécules (Merchant et al., 2012), de l'expression des protéines chez les mammifères (Makransky, Terkildsen, & Mayer, 2019) ou encore de la réplication de l'ADN (Lamb et al., 2018).

La réalité virtuelle est également utilisée en formation professionnelle. De nombreuses applications ont été développées pour la formation à des opérations de maintenance dans l'industrie (e.g., Ganier, Hoareau, & Devillers, 2013; Gavish et al.,

2013; Gomes De Sá & Zachmann, 1999). On trouve également des applications pour la formation à des opérations d'assemblage dans l'industrie, par exemple pour le soudage de châssis de camion (Ordaz et al., 2015) ou l'assemblage de portières de voiture (Langley et al., 2016). La formation à la chirurgie est une autre application courante de la réalité virtuelle (e.g., Fang, Wang, Liu, Su, & Yeh, 2014; Jensen, Ringsted, Hansen, Petersen, & Konge, 2014; Khan et al., 2014). Enfin, certaines applications ont été développées pour la formation à la prévention des risques, par exemple dans le secteur du bâtiment (Sacks, Perlman, & Barak, 2013) ou pour les aides à domicile (Polivka et al., 2019).

L'utilisation de la réalité virtuelle pour la conception est également courante. Il peut s'agir de la conception de produits variés, allant du design de voitures (voir Berg & Vance, 2017 pour des exemples) à l'interface de fours micro-ondes (Bruno & Muzzupappa, 2010). La conception de postes de fabrication dans l'industrie est également fréquente (e.g. Aromaa & Väänänen, 2016; Bernard, Zare, Sagot, & Paquin, 2019; Grajewski, Górski, Zawadzki, & Hamrol, 2013). Nous reviendrons plus en détail dans la partie suivante sur les applications de la réalité virtuelle dans ce domaine. En plus de la conception de produits et de postes, nous relevons des applications de la réalité virtuelle pour l'architecture (e.g., Paes, Arantes, & Irizarry, 2017), pour le paysagisme (e.g., Guo & Yang, 2013) et pour l'urbanisme (e.g., Maffei, Masullo, Pascale, Ruggiero, & Puyana Romero, 2015).

Pour la thérapie, des applications en réalité virtuelle sont développées notamment afin d'exposer, dans un milieu contrôlé et sans risques, les patients à certains environnements. Par exemple, la réalité virtuelle est utilisée dans le traitement du stress post-traumatique (Moraes, de Andrade, & Paiva, 2016) ou encore dans le traitement des délires de persécution (D. Freeman et al., 2016). De la même manière, elle peut être intégrée à des rééducations, par exemple pour rétablir les troubles de l'équilibre causés par la maladie de Ménière (Hsu et al., 2017) ou encore pour la rééducation des membres supérieurs après un AVC (Shin, Ryu, & Jang, 2014).

Enfin, la réalité virtuelle est utilisée dans la recherche. Dans ce domaine elle permet la visualisation de données, mais également la simulation d'environnements afin de conduire des expérimentations. Pour la visualisation de données, on trouve des exemples de données microscopiques en 3D (Theart, Loos, & Niesler, 2017) ou de données atmosphériques (Helbig et al., 2014). Quant aux expérimentations en réalité virtuelle, les exemples sont fréquents en psychologie. Nous relevons notamment des études qui intègrent de la réalité virtuelle pour évaluer l'efficacité de montres vibrotactiles comme moyen de se diriger dans une ville inconnue (Cœugnet et al., 2018) ou pour étudier les comportements des enfants lorsqu'ils traversent la route (Morrongiello, Corbett, Koutsoulouanos, & Foster, 2019)

5. LES APPLICATIONS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS L'INDUSTRIE

Puisque notre travail de thèse se déroule dans l'industrie aéronautique, nous nous sommes intéressée aux changements actuels de ce secteur. En effet, on considère que l'industrie, de manière générale, entre dans une nouvelle ère industrielle. On parle d'une quatrième ère industrielle, qui fait suite à la mécanisation, à l'utilisation intensive de l'électricité et à la digitalisation. On y fait communément référence sous les termes

d'Industrie 4.0, d'Industrie du futur ou encore d'Usine du futur (Lasi, Fettke, Kemper, Feld, & Hoffmann, 2014).

L'industrie 4.0 est née en Allemagne en 2011 à l'initiative du gouvernement et en association avec des universités et des entreprises privées. L'objectif de ce projet est d'assurer la compétitivité de l'Allemagne et de mettre en place des solutions à des problèmes nationaux – les changements démographiques, par exemple – et à des problèmes mondiaux – comme l'appauvrissement des ressources (Kagermann, Hellinger, & Wahlster, 2013). L'industrie 4.0 repose sur la digitalisation des usines et sur l'internet des objets (ou IoT pour *Internet of Things*) (Lasi et al., 2014). Cette dernière notion comprend des objets, des dispositifs, des capteurs et toutes sortes de technologies non informatiques « connectés ». On inclut dans l'IoT des objets qui ont besoin d'une intervention humaine minimale pour générer, échanger et consommer des données ; ils sont fréquemment connectés à des organes de collecte, d'analyse et de gestion des données à distance (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

Certaines notions sont développées dans le cadre de l'Industrie 4.0. On parle par exemple de systèmes de production cyberphysiques (Kagermann et al., 2013) pour exprimer l'idée de connexion entre le monde physique et le monde virtuel. Ces systèmes renvoient à l'idée de réseaux connectés, qui comprennent la totalité du processus de fabrication afin de transformer les usines en environnements intelligents. Ces réseaux comprennent la production et la logistique, mais aussi la vente et les services. Ce qui distingue les systèmes cyberphysiques (CPS) de technologies plus traditionnelles est la simultanéité des interactions entre le monde virtuel et le monde réel. Les CPS utilisent des capteurs pour faire évoluer les processus physiques en temps réel. Ainsi, dans l'industrie 4.0, on prévoit une usine intelligente (*smart factory*) où seraient interconnectées différentes technologies qui seraient autonomes, capables de répondre à des situations variées, capables d'apprendre et équipées de capteurs (Kagermann et al., 2013).

En 2013, dans la lignée de l'Industrie 4.0, le gouvernement français lance la Nouvelle France Industrielle. Il s'agit d'un groupe de réflexion autour de la nouvelle ère industrielle qui propose 34 plans. Ces plans permettent de renouveler le parc industriel français afin de le rendre plus compétitif et plus récent. Ces nouveautés ont pour but de gagner des parts de marché au niveau national et international. Les plans proposés concernent par exemple les énergies renouvelables, la robotique, la cybersécurité ou encore le véhicule autonome. Le projet « Industrie du Futur », lancé en avril 2015, fait partie de ces plans. Il vise à moderniser l'appareil productif français et à développer les processus et outils de production de l'avenir. Ce projet est bâti autour de cinq piliers (Gouvernement Français, 2016) : le développement de l'offre technologique, l'accompagnement des entreprises, la formation des salariés, la promotion de l'industrie du futur et le renforcement de la coopération européenne et nationale. Le développement de l'offre technologique repose sur le rapport Technologies clés 2020 (Direction Générale des Entreprises, 2016), qui dresse une liste de 47 technologies qui entraîneraient des avantages de compétitivité et d'attractivité à la France à l'horizon 2020. Parmi ces technologies, on trouve notamment la cobotique, l'intelligence artificielle, et surtout les technologies immersives qui comprennent la réalité virtuelle. Les projets Nouvelle France Industrielle et plus particulièrement l'industrie du futur témoignent donc d'un intérêt de l'industrie pour la réalité virtuelle, et cela pour des enjeux économiques, commerciaux et concurrentiels, mais également en mettant l'homme au centre des avancées technologiques.

Cette nouvelle ère industrielle a suscité un intérêt de Stelia Aerospace pour la réalité virtuelle – implantée sur le site où ont lieu nos études – et pour son acceptabilité auprès du personnel du site de Méaulte et plus largement. Puisque notre travail de thèse se déroule dans l'industrie aéronautique, nous nous sommes intéressée aux applications de la réalité virtuelle dans l'industrie. Différentes synthèses ont été publiées sur ce sujet. Moreau, Fuchs, & Stergiopoulos (2004) ont décrit trois types d'applications dans l'industrie :

- La première, et la plus courante, concerne les *revues de projet*. Dans ce cadre, la réalité virtuelle est utilisée pour réunir différentes personnes ayant des responsabilités différentes autour d'un prototype virtuel, afin de prendre des décisions.
- La seconde application concerne les tâches d'assemblage et de démontage. Dans ce cadre, le produit a été conçu et il s'agit de vérifier les processus d'assemblage et de maintenance envisagés par les concepteurs en les simulant en réalité virtuelle.
- La troisième application concerne les études ergonomiques des postes. Les auteurs présentent par exemple l'aménagement d'une planche de bord automobile et en particulier l'emplacement d'un bouton-poussoir. Dans ce cadre, la réalité virtuelle est utilisée afin de conduire des études sur l'adaptation d'un produit ou d'un poste aux futurs utilisateurs.

À la même période, Mujber, Szecsi, et Hashmi (2004) ont relevé différents types d'applications de la réalité virtuelle dans la simulation de processus de fabrication. Plus récemment, Hamid, Aziz, & Azizi (2014) ont également relevé ces mêmes catégories d'applications. Pour ces auteurs, les applications de la réalité virtuelle concernent trois champs : la conception, la gestion des activités et le processus d'industrialisation. Pour la conception, la réalité virtuelle est utilisée pour la définition de produit ou pour le prototypage. Lorsqu'elle est utilisée pour la conception de produit, elle permet aux concepteurs de visualiser le produit qu'ils ont conçu dans un environnement virtuel, de l'évaluer ainsi que d'évaluer différentes alternatives. Ils peuvent également interagir avec le produit et conduire des études ergonomiques, en mobilisant par exemple des capteurs sur un utilisateur. Pour le prototypage virtuel, la réalité virtuelle a pour objectif d'évaluer des caractéristiques spécifiques d'un produit à la place ou en combinaison avec un prototype physique.

Concernant la gestion des activités, Hamid, Aziz, & Azizi (2014) relèvent que la réalité virtuelle est utilisée pour la planification, pour la simulation et pour la formation. Pour la planification, elle permet par exemple de programmer les différentes étapes de la fabrication en impliquant tous les acteurs concernés. Pour la simulation, il s'agit d'effectuer des vérifications sur un produit en gardant une trace des événements (par exemple, effectuer des mesures de distance entre deux points), de comprendre les conséquences d'une simulation (par exemple, sur les postures de travail), mais également de communiquer autour d'un projet et de convaincre les acteurs concernés. Quant à la formation en réalité virtuelle, elle permet notamment de donner aux nouveaux employés l'occasion de se former à des tâches dans des environnements sans risques et de comprendre avec des éléments concrets comment fonctionne le processus de fabrication.

La dernière catégorie d'applications identifiée par les auteurs concerne le processus d'industrialisation. La réalité virtuelle y est utilisée pour l'usinage, l'assemblage et l'inspection. Pour l'usinage virtuel, on s'intéresse à des opérations

telles que le perçage, le fraisage, l'ajustage, etc. L'usinage virtuel permet à l'utilisateur de simuler ces opérations afin d'étudier la qualité de l'usinage, le temps de réalisation d'une pièce, ou encore les mouvements relatifs de la pièce et de la machine. L'assemblage virtuel consiste à utiliser la réalité virtuelle dans l'objectif de simuler le montage ou le démontage d'une pièce ou d'un produit. Cette application de la réalité virtuelle vise notamment à prédire la qualité de l'assemblage, les moyens à mettre en œuvre et ses coûts. Elle vise également à traiter de la question de la vérification des procédures d'assemblage et de désassemblage. La dernière application relevée par les auteurs concerne l'inspection. Dans ce cadre, la réalité virtuelle est utilisée afin d'étudier les méthodes d'inspection ou encore, les facteurs pouvant avoir une influence sur la qualité de l'inspection.

SYNTHÈSE DU CHAPITRE 1

Ce premier chapitre avait pour objectif de présenter la réalité virtuelle, qui est la technologie sur laquelle porte notre recherche. Alors que les définitions de la réalité virtuelle sont nombreuses et variées, nous avons repris la définition consensuelle donnée par le domaine de la réalité virtuelle en France qui s'articule autour de deux notions : **l'immersion** et **l'interaction** (Fuchs, Berthoz, et al., 2006). En d'autres termes, on considère donc qu'on peut parler de réalité virtuelle si un utilisateur est immergé dans un environnement virtuel ET qu'il peut interagir avec celui-ci en temps réel.

Nous avons également présenté **quatre types de dispositifs** exploités en réalité virtuelle (Burkhardt, 2003) : des dispositifs de présentation visuelle ; des dispositifs de capture de mouvement et de position ; des dispositifs de retour proprioceptifs et cutanés ; et, des dispositifs d'entrée et de présentation sonore.

Nous avons ensuite décrit les **principales applications** de la réalité virtuelle. De manière générale, il s'agit des jeux vidéo, de l'art, du tourisme et du travail. Nous nous sommes arrêtée plus longuement sur les applications professionnelles de la réalité virtuelle, au sujet desquelles nous avons donné des exemples pour l'éducation, la formation professionnelle, la conception, la thérapie et la recherche. Nous avons consacré la dernière section de ce chapitre aux applications de la réalité virtuelle dans l'industrie, puisque c'est dans ce secteur que s'est déroulé notre travail de recherche. Hamid et al. (2014) résume les applications de la réalité virtuelle dans ce secteur en trois catégories : la **conception** (définition de produit, prototypage virtuel) ; la **gestion des activités** (planification, simulation, formation) ; et le **processus d'industrialisation** (usinage, assemblage virtuel, inspection).

Le prochain chapitre sera consacré à l'interaction entre l'homme et la réalité virtuelle. Nous présenterons la contribution de l'ergonomie dans la conception et l'évaluation des technologies de réalité virtuelle autour de différents concepts : l'utilité, l'utilisabilité, l'immersion et l'interaction, la présence, et le mal des environnements virtuels.

CHAPITRE 2. DIFFÉRENTS CONCEPTS CENTRAUX DANS L'ÉTUDE DE L'INTERACTION ENTRE L'HOMME ET LA RÉALITÉ VIRTUELLE

L'ergonomie contribue à la conception et à l'évaluation des systèmes de réalité virtuelle afin qu'ils soient le mieux possible adaptés aux utilisateurs, à leurs objectifs, aux contextes d'usage, mais aussi afin qu'ils répondent à des exigences de confort ou de sécurité. Les apports de la discipline sont donc variés. Dans cette partie, nous proposons d'illustrer quelques apports de l'ergonomie dans le domaine de la réalité virtuelle en nous arrêtant sur différents concepts centraux dans la conception et dans l'évaluation de l'interaction entre l'homme et la réalité virtuelle.

Nous commencerons par deux dimensions centrales en ergonomie informatique (Burkhardt & Sperandio, 2004) que sont l'utilisabilité et l'utilité. Puis, nous présenterons différentes dimensions spécifiques aux technologies immersives : d'abord, l'immersion et l'interaction, ensuite, la présence, enfin le mal des environnements virtuels. Pour chacune des dimensions présentées, nous commencerons par des éléments de définitions avant de répertorier différentes méthodes d'évaluation. Nous ferons un point sur les méthodes d'évaluation utilisées pour les technologies traditionnelles et celles qui ont été adaptées ou développées pour la réalité virtuelle.

1. L'UTILISABILITÉ

1.1. Définitions de l'utilisabilité

L'utilisabilité est sans nul doute la notion la plus centrale dans l'étude de l'interaction entre l'homme et la technologie (Hornbæk, 2006). Pour les concepteurs, elle est d'ailleurs souvent considérée comme le seul critère ergonomique devant être pris en compte (Burkhardt & Sperandio, 2004).

Même si l'utilisabilité est une notion grandement traitée depuis les années 1980, il est difficile d'en trouver une définition unique (Barcenilla & Bastien, 2009). La définition de Shackel (1991) est certainement la plus connue et la plus reprise. Elle définit l'utilisabilité d'un système comme « sa capacité, en termes fonctionnels humains, à permettre une utilisation facile et effective par une catégorie donnée d'utilisateurs, avec une formation et un support adapté, pour accomplir une catégorie donnée de tâches, à l'intérieur d'une catégorie spécifique de contextes » (Shackel, 1991, p. 24, traduction de Barcenilla & Bastien, 2009, p. 313). L'utilisabilité résulte donc de l'interaction entre un utilisateur, un système et un contexte donné.

C'est en partie sur cette définition que se fonde la définition de l'utilisabilité donnée par la norme ISO 9241-11 (1998, 2008) (Barcenilla & Bastien, 2009). Dans cette norme, elle est définie comme la combinaison de trois dimensions : l'efficacité, l'efficience et la satisfaction.

L'efficacité désigne « la précision ou le degré d'achèvement selon lesquels l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés » (ISO 9241-11, 1998, traduction de Brangier et Barcenilla, 2003, p. 76). Elle renvoie à la réussite ou à l'échec de l'utilisateur dans l'atteinte de ses buts. Pour satisfaire ce critère, le système doit *effectivement* permettre à l'utilisateur de remplir un objectif donné. L'efficacité s'appuie uniquement sur la réussite ou l'échec de l'utilisateur, sans que n'interviennent le temps de

réalisation de la tâche ni les efforts mobilisés. Par exemple, si l'objectif de l'utilisateur est de réserver un billet de train au moyen d'une application mobile, on considérera que l'application est efficace si l'utilisateur parvient effectivement à acheter son billet. On considérera que l'application n'est pas efficace si l'utilisateur a rencontré plusieurs pages d'erreurs après avoir saisi ses identifiants et qu'il a été contraint de commander son billet en passant au guichet ou en utilisant un site web sur son ordinateur.

L'*efficacité* concerne « le rapport entre les ressources dépensées et la précision et le degré d'achèvement selon lequel l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés » (ISO 9241-11, 1998, traduction de Brangier et Barcenilla, 2003, p. 76). Elle renvoie à la capacité du système de permettre à l'utilisateur d'atteindre ses buts avec un minimum d'efforts. Dans l'exemple précédent, on considérera que l'application est efficace si l'utilisateur parvient à réserver un billet de train rapidement et sans commettre d'erreurs.

La *satisfaction* correspond à « l'absence d'inconfort et aux attitudes positives envers l'utilisation d'un système » (ISO 9241-11, 1998, p. 2, notre traduction). Elle renvoie par exemple au plaisir ressenti par l'utilisateur lors de et suite à l'usage du système. C'est une évaluation subjective qui provient d'une comparaison entre ce que l'acte d'usage apporte à l'individu et ce qu'il s'attend à recevoir (Brangier et Barcenilla, 2003). Puisqu'elle est subjective, cette composante de l'utilisabilité est difficile à évaluer. Les évaluations peuvent comprendre des indicateurs subjectifs et complexes (perceptions de l'efficacité, de l'efficacité et de l'utilité, souvenir que l'utilisateur a de l'interaction, etc.) qui rendent les interprétations de ces données difficiles. Si nous reprenons l'exemple précédent, et en simplifiant la satisfaction pour illustrer ce à quoi elle renvoie, nous considérerons que l'application est satisfaisante si l'utilisateur rapporte que son utilisation a été plaisante et qu'il considère que c'est un moyen efficace et rapide pour réserver ses billets de train.

Certains auteurs incluent par ailleurs d'autres composantes à l'utilisabilité. En plus de l'efficacité, de l'efficacité et de la satisfaction, Brangier et Barcenilla (2003) incluent *l'apprenabilité* et la *mémorisation*.

L'*apprenabilité* concerne les premières interactions de l'utilisateur avec le système. On considère en effet que l'utilisateur doit être efficace dans la tâche dès ses premières utilisations du système. Pour cela, les caractéristiques intrinsèques du système sont importantes, et en particulier son *accessibilité* et sa *transparence*. L'*accessibilité* renvoie à la capacité du système « à être compris et à être utilisé sans informations complémentaires » (Brangier et Barcenilla, 2003, p. 52). La *transparence* englobe l'*accessibilité* et correspond à « la capacité du système à favoriser l'élaboration d'une représentation mentale permettant de se faire une idée sur la gestion des interactions, en fournissant des repères sur les effets des actions et les résultats obtenus » (Brangier et Barcenilla, 2003, p. 53). Pour reprendre l'exemple de l'utilisateur qui réserve ses billets de train sur une application mobile, on considérera que l'application possède une bonne *apprenabilité* si l'utilisateur, dès sa première commande de billets, n'a pas besoin d'une aide extérieure pour se servir de l'application (par exemple, d'indications qui renseignent sur le type d'informations à saisir dans les formulaires).

La *mémorisation* renvoie à l'idée que l'utilisateur doit assimiler le fonctionnement du système de manière durable. On s'intéresse ici à la stabilité ou l'amélioration de la performance de l'utilisateur au fil des usages (Brangier et Barcenilla, 2003). En effet, si l'utilisateur a mémorisé le fonctionnement du système,

lorsqu'il l'utilise de nouveau après une période d'inactivité, il doit pouvoir l'utiliser aussi facilement que lors de sa dernière interaction, ou, mieux, améliorer sa performance. Si ce critère n'était pas respecté dans notre exemple d'application mobile permettant de réserver des trains, l'utilisateur devrait à chaque utilisation se familiariser de nouveau avec le système.

Les travaux scientifiques sur l'utilisabilité ont débouché sur la création de normes, de recommandations ou encore de critères ergonomiques (Brangier, Hammes-Adelé, & Bastien, 2010), que nous allons maintenant présenter.

1.2. Méthodes d'évaluation de l'utilisabilité

Deux catégories de méthodes d'évaluation de l'utilisabilité ont été distinguées : d'une part, celles qui requièrent la participation directe des utilisateurs et, d'autre part, les méthodes basées sur les interfaces (Bastien, 2004). La première catégorie de méthodes mobilise des utilisateurs pour procéder à des enquêtes d'usage, à des tests utilisateurs, à des captures d'événements, à des questionnaires de satisfaction et à des entretiens. La seconde catégorie de méthodes comprend les modèles, les méthodes et langages formels, les outils automatiques d'évaluation, le recours à l'expert et les méthodes d'inspection. Nous nous centrerons plus particulièrement sur les enquêtes d'usage, les tests utilisateurs et les méthodes d'inspection.

Les *enquêtes d'usage* reposent sur l'analyse de la manière dont l'utilisateur interagit avec un produit donné dans une situation réelle. Le comportement de l'utilisateur est analysé en prenant en compte la situation sociale et culturelle dans laquelle il s'inscrit. Différentes méthodes sont mobilisées. Il s'agit par exemple d'observations *in situ*, de recueils de verbalisations concomitantes ou consécutives à l'activité, des entretiens, des questionnaires ou d'analyses des traces d'usage.

Les *tests utilisateurs* sont des situations expérimentales lors desquelles on demande à un groupe d'utilisateurs cibles de réaliser un certain nombre de tâches. Ces tâches sont organisées en scénarios construits par les évaluateurs en lien avec les concepteurs. L'objectif de ces tests est d'identifier des difficultés rencontrées par les utilisateurs lors de leurs interactions avec la technologie. Lors de ces tests, on recueille des mesures quantitatives (temps de réalisation, nombre d'erreurs, etc.) et qualitatives (sentiment de satisfaction, impression, vécu, etc.) qui seront ensuite interprétées afin de formuler des recommandations pour améliorer la technologie. Ces tests utilisateurs peuvent intégrer différents questionnaires, qui peuvent très bien également servir de méthode d'évaluation de l'utilisabilité à part entière. Le *System Usability Scale* (SUS) (Brooke, 1996) en fait partie. Il comprend 10 items et il est donc rapide à administrer, ce qui en fait une méthode fréquemment utilisée pour l'évaluation de l'utilisabilité des technologies (Lewis & Sauro, 2017). Un recueil des questionnaires évaluant l'utilisabilité des systèmes est proposé par Lallemand et Gronier (2018).

Concernant les méthodes d'évaluation, il s'agit de l'examen d'une interface par un expert (ergonome, psychologue) afin d'y détecter des problèmes d'utilisabilité. Les méthodes d'inspection les plus utilisées s'appuient sur des normes, des recommandations, des critères et des heuristiques. Sans chercher à être exhaustive, nous illustrerons chacune de ces méthodes d'inspection par des exemples.

Les inspections peuvent s'appuyer sur :

- des recommandations issues des normes ;
- sur des guides de style ;

- des recommandations ergonomiques.

La norme ISO 9241-11 (1998, 2008), en plus de définir l'utilisabilité, comprend des recommandations qui concernent par exemple la présentation des informations, des menus ou encore des commandes. Les *guides de style* sont des recommandations établies par des constructeurs afin d'assurer la cohérence et de distinguer les interfaces qu'ils développent de celles de leurs concurrents (Bastien, 2004). On peut notamment citer les guides de style développés par Apple pour macOS, iOS, watchOS et tvOS (Apple, 2019). Ces recommandations concernent par exemple le visuel des messages d'alertes, des fenêtres ou des volets de navigation. Enfin, les *recommandations ergonomiques* sont composées d'un ensemble de conseils de manière à concevoir des interfaces homme-machine les mieux adaptées aux utilisateurs et aux contextes d'usage (Brangier & Bastien, 2010). Elles sont très générales et aussi très nombreuses (Bastien, 2004 ; Brangier et al., 2010). Elles sont généralement regroupées dans des recueils ou des guides généraux. Par exemple, le recueil de Smith et Mosier (1986) contient 944 recommandations. Elles concernent l'entrée et l'affichage des données, le contrôle, le guidage de l'utilisateur, la transmission des données et leur protection. On peut également noter que des recommandations ont été formulées pour des systèmes spécifiques, tels que les sites web (Nielsen & Loranger, 2006), les logiciels (e.g. Leduc, Valléry, Belhari, & Gaston, 2014), ou encore les technologies mobiles (e.g. Rauch, 2011).

De la même manière que pour les recommandations, les critères ergonomiques peuvent guider les inspections. Ces critères ont pour objectif de formaliser et de structurer les recommandations ergonomiques selon des principes opérationnels de conception (Bastien, 2004; Brangier et al., 2010). Parmi ces critères, ceux proposés par Scapin et Bastien (1997) sont sans conteste les plus utilisés. Leur objectif est double. Il s'agit à la fois de synthétiser les apports issus de la diversité des techniques d'évaluation d'interfaces (recommandations, recours à des experts, *checklists*, normes) ainsi que de répondre aux problèmes de validité de certaines recommandations en validant empiriquement les critères obtenus. Pour construire ces critères, les auteurs ont traduit des recommandations issues de la littérature en différentes dimensions. Ces dimensions sont ensuite regroupées par objectif. Ils ont ainsi construit 8 critères principaux qui sont ensuite sous-divisés en 18 sous-critères élémentaires à vérifier. Les critères principaux sont les suivants :

- le guidage : le système doit conseiller, orienter, informer et guider l'utilisateur lors de ses interactions ;
- la charge mentale : le système doit limiter la charge mentale de l'utilisateur afin de prévenir ses erreurs ;
- le contrôle explicite : le système traite les actions explicites de l'utilisateur et l'utilisateur a un contrôle sur les actions du système ;
- l'adaptabilité : le système doit agir selon les besoins et les préférences de l'utilisateur ;
- la gestion des erreurs : des moyens sont mobilisés afin de prévenir ou de réduire les erreurs et de les corriger quand elles ont lieu ;
- la consistance : les choix de conception (intitulés, formats, procédures) sont les mêmes dans des contextes similaires et varient dans des contextes différents ;
- la signifiante des codes et des dénominations : les codes et les noms doivent avoir de forts liens sémantiques avec les items ou les actions auxquels ils font référence ;

- la comptabilité : l'organisation des entrées et des sorties d'informations et des dialogues du système doit être adaptée aux caractéristiques des utilisateurs (mémoire, perceptions, âge, compétences) et aux caractéristiques de la tâche.

Les inspections heuristiques reposent sur une liste de principes propres à détecter des problèmes d'utilisabilité à la fois lors de la conception d'une interface et en phase d'évaluation (Nielsen, 1994; Nielsen & Molich, 1990). Le terme d'« heuristique » renvoie généralement aux travaux de Molich et Nielsen (1990), qui ont défini une liste de principes à suivre pour garantir l'utilisabilité d'une interface. Ces principes sont les suivants :

- fournir un dialogue simple et naturel : les dialogues ne doivent pas contenir d'informations sans rapport ou rarement utiles ;
- utiliser le langage de l'utilisateur : le dialogue doit utiliser des mots clairs, familiers à l'utilisateur ;
- minimiser la mémorisation : l'utilisateur ne doit pas mémoriser des informations d'un écran à un autre ;
- être cohérent : l'utilisateur ne doit pas se demander si des situations, des actions ou des mots différents renvoient à la même idée ;
- fournir un retour d'information (feedback) : le système doit toujours indiquer à l'utilisateur ce qui se passe et dans un délai raisonnable ;
- fournir des moyens explicites de contrôle du dialogue : le système ne doit jamais mettre l'utilisateur dans des situations où il ne voit pas de sortie simple ;
- fournir des raccourcis : les utilisateurs expérimentés doivent pouvoir utiliser des raccourcis ;
- fournir de bons messages d'erreurs : de bons messages d'erreur ne critiquent pas l'utilisateur, donnent des indications sur l'origine du problème et suggèrent à l'utilisateur quoi faire ;
- prévenir les erreurs : il n'est pas suffisant de concevoir de bons messages d'erreur, il faut prévenir les erreurs en premier lieu.

Nous venons de présenter différentes méthodes d'évaluation de l'utilisabilité de technologies traditionnelles. Attardons-nous maintenant sur les méthodes visant à évaluer cette même dimension pour les environnements virtuels. Nous commencerons par noter que les auteurs s'accordent pour dire que les environnements virtuels présentent certaines caractéristiques qui compliquent l'application telles que les méthodes déjà existantes (Bowman, Gabbard, & Hix, 2002; Stanney, Mollaghasemi, Reeves, Breaux, & Graeber, 2003). Bowman, Gabbard, et Hix (2002) pointent cinq de ces caractéristiques, qui les distinguent des technologies traditionnelles et qui peuvent poser problème. La première catégorie de problèmes concerne l'environnement physique qui entoure l'utilisateur et qui est considéré comme un élément important dans son interaction avec la réalité virtuelle. Par exemple, lorsqu'il utilise un visio-casque, l'utilisateur ne voit pas le monde qui l'entoure. L'évaluateur doit donc s'assurer qu'il ne trébuche pas dans des fils ou ne percute pas des objets lorsqu'il se déplace ; ce qui pourrait être à la fois risqué pour l'utilisateur et biaiser les résultats de l'évaluation.

La seconde catégorie de problèmes est relative à l'évaluateur. En effet, la présence de l'évaluateur peut entraîner certaines situations qui ne surviennent pas lors des évaluations d'interfaces plus traditionnelles. Par exemple, si l'évaluateur bouge alors qu'il est dans le champ de vision de l'utilisateur d'un CAVE, il peut

entraîner des ruptures de présence². L'évaluateur devra donc veiller à ne pas intervenir lors des évaluations, ce qui requiert que les technologies utilisées soient suffisamment robustes pour que l'évaluation ait lieu sans bug, mais également que l'utilisateur puisse être autonome dans la réalisation de la tâche.

La troisième catégorie de problèmes renvoie à la population mobilisée lors des tests. L'utilisation de la réalité virtuelle étant relativement peu courante, il est parfois difficile de mobiliser des utilisateurs finaux des applications évaluées. Il faut toutefois veiller à inclure dans les évaluations des participants présentant différentes caractéristiques en termes d'âge, de genre, d'expérience antérieure, etc. Par ailleurs, il faut garder en tête que la réalité virtuelle a des conséquences sur les utilisateurs (présence et mal des environnements virtuels³).

La quatrième catégorie de problèmes est relative aux types d'évaluations de l'utilisabilité possibles. En effet, pour les interfaces traditionnelles, il existe différents types de méthodes dont certaines ont été présentées auparavant. Toutefois, au vu de la complexité des environnements virtuels et de leur relative nouveauté, il est difficile de mettre au point des méthodes générales et universelles pour les évaluer. Des critères ergonomiques ont pourtant été définis spécialement pour les environnements virtuels (nous présenterons un exemple de ces critères dans cette partie). Toutefois, en vue de la variété des applications développées, il est difficile d'utiliser ces critères comme seule base pour l'évaluation.

Enfin, la dernière catégorie de problèmes relevée par Bowman, Gabbard, et Hix (2002) concerne le degré de focalisation des évaluations et la potentielle généralisation des résultats. En effet, alors que les évaluations des interfaces traditionnelles peuvent traiter de l'interface dans sa totalité, les évaluations des environnements virtuels se centrent sur des aspects spécifiques et moins larges, par exemple, sur un dispositif d'entrée de données particulier ou sur certaines interactions spécifiques. Par ailleurs, la généralisation des résultats obtenus peut être dangereuse puisque les évaluations sont fréquemment conduites hors contexte d'usage et que la réalité virtuelle, d'un point de vue matériel, logiciel ainsi qu'en termes d'environnements virtuels développés, évolue rapidement.

Pour ces raisons, des méthodes ont été développées spécifiquement pour les environnements virtuels. Il s'agit principalement de méthodes développées pour l'évaluation d'interfaces traditionnelles et qui ont ensuite été étendues aux environnements virtuels (Bowman et al., 2002).

Des recommandations ont ainsi été établies spécialement pour assurer l'utilisabilité des environnements virtuels. Stanney et al. (2003) ont proposé un outil appelé MAUVE (*Multi-criteria Assessment of Usability for Virtual Environment*). Il s'agit d'une grille qui regroupe des recommandations en différents critères. Ces critères concernent le système en lui-même et l'interface avec l'utilisateur. Pour le système, on retrouve des recommandations sur l'interaction (plus spécifiquement l'orientation, la navigation, la manipulation d'objet) et sur les sorties multimodales (visuelles, auditives et haptiques). Pour l'interface avec l'utilisateur, on retrouve des critères sur

² Nous consacrerons une partie de cet état de l'art à cette notion. Admettons ici qu'il s'agit du sentiment pour l'utilisateur d'*être* dans l'environnement virtuel (et non dans le monde physique, en train d'utiliser un système de réalité virtuelle).

³ Une autre partie de ce chapitre portera sur cette notion. Il s'agit de symptômes qui font suite à une exposition à un environnement virtuel.

l'engagement de l'utilisateur (présence, immersion) et sur les conséquences de l'utilisation (confort, mal des environnements virtuels, conséquences physiologiques).

Les critères de Scapin et Bastien (1997) présentés précédemment ont par ailleurs été adaptés aux interactions hommes-environnement virtuel. Pour construire ces critères, Bach et Scapin (2005; 2003) ont procédé de la manière suivante : d'abord, ils ont formulé des critères à partir d'un recueil dans la littérature de résultats d'évaluations de l'utilisabilité d'environnements virtuels ou de recommandations déjà établies ; ensuite, ils ont traduit les critères formulés en recommandations et enfin, ils ont classifié ces recommandations en critères. On peut noter des différences par rapport aux critères de Scapin et Bastien (1997). Deux critères ont été ajoutés : la *Charge physique* et le *Groupement / la distinction par le Comportement*. Le critère *Signifiante des codes et dénominations* a été modifié en *Signifiante des codes, dénominations et comportements*, afin d'inclure les dimensions comportementales entrant en jeu dans l'utilisation des environnements virtuels. L'ordre a également été modifié pour correspondre à une stratégie potentielle d'inspection. Pour résumer, 8 critères principaux et 20 critères élémentaires ont été formulés. Les huit critères principaux sont les suivants :

- la compatibilité, qui réfère à l'adéquation entre les caractéristiques de l'utilisateur, les caractéristiques de la tâche et l'organisation des entrées et des sorties d'informations ;
- le guidage, qui correspond aux moyens mis en œuvre pour orienter, informer et guider l'utilisateur lors de son interaction avec l'environnement virtuel ;
- le contrôle, explicite qui renvoie à la prise en compte par le système des actions explicites de l'utilisateur ainsi qu'au contrôle dont ce dernier dispose sur le traitement de ses actions par le système ;
- la signifiante des codes, des dénominations et des comportements, qui réfère à l'adéquation entre un objet, un comportement ou une information et son référent ;
- la charge de travail, qui correspond à la mobilisation perceptive, physique et mnésique de l'utilisateur et qu'on cherche à réduire ;
- l'adaptabilité, qui concerne la capacité du système à réagir selon le contexte, les besoins et les préférences de l'utilisateur ;
- l'homogénéité / la cohérence, qui renvoie à la façon selon laquelle les choix de conception de l'interface (dispositifs, codes, dénominations, comportements, etc.) sont conservés dans des contextes similaires et sont différents dans des contextes différents ;
- la gestion des erreurs, qui concerne les moyens mis en œuvre pour éviter ou réduire les erreurs et pour les corriger quand elles surviennent.

En plus des méthodes par inspection que nous présentons ici, nous retrouvons les méthodes d'évaluation de l'utilisabilité qui requièrent des utilisateurs, telles que nous les présentions à l'ouverture de cette partie (tests utilisateurs, enquêtes d'usage, questionnaires, entretiens...).

Pour résumer, il est clair que l'utilisabilité des systèmes reste une dimension centrale de l'interaction homme-technologie qui prend également une grande importance dans l'interaction avec la réalité virtuelle. Les méthodes que nous relevons ici sont toutefois issues de méthodes déjà existantes et utilisées pour des interfaces traditionnelles. Nous verrons dans la suite de cette partie que les auteurs s'attachent tout de même à intégrer les spécificités de la réalité virtuelle en évaluant deux

conséquences de l'exposition à des environnements virtuels que sont la présence et le mal des environnements virtuels.

2. L'UTILITÉ

2.1. Définitions de l'utilité

En ergonomie, l'utilité est considérée comme un autre critère central dans la conception et l'évaluation des technologies (Burkhardt & Sperandio, 2004). Elle est pensée comme une « propriété se situant à l'interface entre le système, le sujet et la situation, correspondant à une réponse à un besoin ou à une attente de l'utilisateur » (Loup-Escande, Burkhardt, & Richir, 2013, p. 30).

Deux dimensions de l'utilité ont été distinguées : l'utilité-destination et l'utilité-valeur (Loup-Escande et al., 2013). L'*utilité-destination* renvoie aux fonctionnalités des systèmes et aux utilisations inscrites dans l'artefact. Nielsen (1993) a distingué deux niveaux à ce type d'utilité. Selon la traduction de Tricot et al. (2003), on peut parler d'utilité « théorique » (*utility* pour Nielsen) et d'utilité « pratique » (*usefulness* pour Nielsen). L'utilité théorique renvoie aux buts que le système est censé atteindre, alors que l'utilité pratique correspond aux buts que le système permet effectivement d'atteindre par un utilisateur donné dans un contexte donné. Pour Nielsen (1993), l'utilité pratique dépend à la fois de l'utilité théorique et de l'utilisabilité du système.

L'*utilité-valeur* renvoie à la « plus-value » d'une technologie, c'est-à-dire aux avantages significatifs que la technologie peut apporter aux utilisateurs. Ces avantages sont toujours relatifs ; ils dépendent des objectifs de l'utilisateur, des outils qu'il utilise habituellement, des alternatives qu'il peut mobiliser pour atteindre les mêmes objectifs, du contexte d'utilisation, ou encore des dépendances avec les autres activités.

2.2. Méthodes d'évaluation de l'utilité

Les méthodes d'évaluation de l'utilité d'une technologie varient selon que l'on s'intéresse à l'utilité-destination ou à l'utilité-valeur. Par exemple, lorsque l'on s'intéresse à l'utilité-destination d'un système de réalité virtuelle pour la formation à une procédure, on s'interroge sur les objectifs généraux de la technologie. Est-ce que l'environnement virtuel présente bien le contexte dans lequel se réalise la procédure donnée ? Est-ce qu'il permet bien aux apprenants d'identifier et de réaliser les différentes étapes pour réaliser cette procédure ? Dans la littérature, les auteurs traitent de l'utilité-destination en présentant des technologies pouvant répondre à certaines problématiques ou à des objectifs généraux. Ainsi, différentes études décrivent des applications ou des dispositifs de réalité virtuelle dans des cas d'usage spécifiques. C'est le cas de Abate, Guida, Leoncini, Nappi, et Ricciardi (2009). Ces auteurs reprochent aux formations en réalité virtuelle d'intégrer des interactions non naturelles (par exemple avec des claviers ou des souris), qui sont alors très différentes des tâches réelles. Pour répondre à cette limite, ils proposent d'intégrer un dispositif haptique dans un environnement virtuel de formation destiné à la maintenance dans l'industrie aérospatiale. Les auteurs en décrivent d'abord le fonctionnement, puis ils présentent des résultats expérimentaux sur l'utilisation du dispositif, notamment sur l'efficacité des manipulations ou sur le temps de réalisation de la tâche. Les auteurs

traitent donc de l'utilité-destination du système en montrant que le système de retour haptique est bien efficace couplé à un environnement virtuel de formation.

La deuxième dimension de l'utilité, l'utilité-valeur renvoie à l'idée que la technologie doit présenter un avantage pour l'utilisateur. Puisque la plus-value d'une technologie dépend du contexte, son évaluation varie elle aussi. L'utilité de la réalité virtuelle est surtout évaluée dans trois domaines d'applications : pour la formation (ou l'éducation), pour la thérapie et pour la conception de postes. Pour chacune de ces applications, différentes métriques sont utilisées.

Lorsque l'on évalue l'utilité de la réalité virtuelle dans la formation ou dans l'éducation, on la compare fréquemment à des outils de formation plus traditionnels. L'étude de Langley et al. (2016) en est un exemple. En effet, les auteurs ont évalué les avantages à utiliser la réalité virtuelle pour la formation à l'assemblage dans l'industrie automobile, comparativement à d'autres outils de formation dits traditionnels, c'est-à-dire des cours papier, des vidéos et des démonstrations du formateur. Cette comparaison reposait sur deux mesures objectives : le nombre d'erreurs et le temps de réalisation de la tâche. Les résultats montrent que les opérateurs font significativement moins d'erreurs lorsqu'ils ont été formés avec la réalité virtuelle que lorsqu'ils ont été formés avec des outils traditionnels. En revanche, aucune différence significative n'est relevée pour le temps de réalisation de la tâche. Cette étude montre donc une « plus-value » de l'utilisation de la réalité virtuelle dans la formation à l'assemblage automobile, notamment sur le critère du nombre d'erreurs.

L'étude de Codd et Choudhury (2011) est un autre exemple de comparaison entre la réalité virtuelle et d'autres outils de formation, cette fois-ci dans l'éducation. Ils ont ainsi comparé l'apprentissage de l'anatomie chez les étudiants qui utilisaient soit un environnement virtuel, soit des méthodes traditionnelles, en l'occurrence des dissections et des manuels d'anatomie. Les auteurs ont comparé les scores à un test pratique de ces deux groupes et d'un groupe contrôle. Ils n'ont pas relevé de différences significatives entre les deux méthodes d'apprentissage. Cette comparaison, bien qu'elle ne mette pas en évidence de différence significative, avait bien pour objectif d'évaluer l'utilité-valeur de la réalité virtuelle dans ce contexte. Par ailleurs, les auteurs relèvent une différence significative entre le groupe ayant utilisé la réalité virtuelle et le groupe contrôle. Cette différence relève de l'utilité-destination ; elle montre que la réalité virtuelle remplit bien son objectif pédagogique.

Les évaluations de l'utilité-valeur de la réalité virtuelle en thérapie reposent sur les mêmes méthodes. Il s'agit de comparer la réalité virtuelle à des thérapies plus traditionnelles. Par exemple, dans l'étude de Ready, Gerardi, Backscheider, Mascaro, et Rothbaum (2010) conduite auprès de vétérans de la guerre du Vietnam, une thérapie d'exposition en réalité virtuelle est comparée à une thérapie en face à face centrée sur le moment présent. Les résultats ne montrent pas de différences significatives sur les symptômes de dépression et de stress post-traumatique des participants, mais cette étude illustre bien une évaluation de l'utilité-valeur de la réalité virtuelle en thérapie.

Les bénéfices de la réalité virtuelle ont également été étudiés dans la conception de poste. Par exemple, dans une étude ergonomique sur une tâche d'assemblage, Pontonnier, Dumont, Samani, Madeleine, et Badawi (2014) ont comparé la simulation d'une tâche en réalité virtuelle avec et sans retour d'effort avec la simulation de la même tâche en environnement réel. Ils montrent que l'environnement virtuel sans retour d'effort est préféré à l'environnement virtuel avec

retour d'effort. Ce dernier est jugé globalement moins réaliste, notamment pour les interactions. Les utilisateurs ont également eu plus de difficulté à exécuter la tâche.

Plus généralement, pour la conception de postes, on relève plusieurs avantages de la réalité virtuelle sur des méthodes plus traditionnelles : elle est moins coûteuse, elle permet de se passer de prototypes physiques ou encore d'anticiper certaines erreurs dans la conception du poste.

Nous avons vu dans cette partie que l'évaluation de l'utilité des technologies de manière générale, et des technologies de réalité virtuelle en particulier, varie selon les objectifs des applications. Toutefois, on peut noter quelques similitudes dans les méthodes. Pour l'utilité-destination, il s'agit principalement d'étudier l'efficacité de la technologie pour un objectif donné. Pour l'utilité-valeur, il s'agit de comparer la technologie à d'autres outils.

Les prochaines parties de cet état de l'art seront consacrées à des dimensions spécifiques aux technologies immersives. Nous commencerons par les deux dimensions centrales dans la caractérisation de la réalité virtuelle, c'est-à-dire l'immersion et l'interaction. Puis, nous nous arrêterons sur deux conséquences de l'exposition à des environnements virtuels : la présence et le mal des environnements virtuels.

3. L'IMMERSION ET L'INTERACTION

3.1. Définitions de l'immersion et de l'interaction

Nous avons défini précédemment l'immersion et l'interaction comme les deux caractéristiques principales de la réalité virtuelle. *L'immersion* renvoie à la capacité des dispositifs à renvoyer aux sens humains une illusion inclusive, extensive, environnante et riche (Slater & Wilbur, 1997). Ces différentes propriétés peuvent s'expliquer ainsi :

- l'illusion est plus ou moins *inclusive* selon le degré avec lequel elle met le monde physique à l'écart ;
- elle est plus ou moins *extensive* selon le nombre de modalités sensorielles qu'elle englobe ;
- elle est plus ou moins *environnante* selon qu'elle propose une vue panoramique ou un champ de vision restreint ;
- elle est plus ou moins *riche*, selon la richesse de l'information qu'elle renvoie ainsi que selon la résolution et la qualité des dispositifs d'affichage.

Pour parler d'une expérience en réalité virtuelle, il faut que l'utilisateur puisse agir dans le monde virtuel dans lequel il est immergé : on parle *d'interaction*. Elle peut être définie comme la communication entre l'utilisateur et la technologie par le biais de dispositifs d'entrée et de sortie (Jerald, 2016). Certains auteurs évoquent une autre notion, celle *d'interactivité* des dispositifs, qu'ils définissent comme le degré avec lequel les utilisateurs peuvent modifier la forme et le contenu de l'environnement virtuel en temps réel (Steuer, 1992). Sheridan (1992) distingue deux types d'interactions : le contrôle de l'information sensorielle provenant du système (par exemple, la possibilité pour l'utilisateur de tourner la tête pour modifier son point de vue) et la modification directe de l'environnement (par exemple, saisir un objet dans l'environnement virtuel).

L'interaction en réalité virtuelle peut exploiter des schèmes comportementaux importés (on parlera d'interaction *pseudo-naturelle*), ou bien reposer sur des métaphores avec ou sans substitutions sensori-motrices (Fuchs, Burkhardt, & Lourdeaux, 2006). Les schèmes comportementaux importés correspondent à un comportement importé de l'environnement réel pour être transposé et adapté en environnement virtuel. Par exemple, pour saisir un objet en réalité virtuelle, on peut s'appuyer sur les mouvements tels qu'ils sont réalisés dans le monde physique. Ainsi, l'utilisateur équipé de gants de données devra avancer son bras vers l'objet, puis ouvrir et fermer sa main pour le saisir. L'interaction est qualifiée de *pseudo naturelle*, car, bien que prenant ses origines dans des mouvements réels, l'action de saisir un objet en réalité virtuelle comporte des différences sensori-motrices : l'utilisateur n'a notamment pas le même degré de précision dans ses mouvements et le retour haptique (s'il existe) est différent de celui du monde physique.

Par ailleurs, les contraintes techniques, économiques et théoriques ne permettent pas toujours d'importer des schèmes comportementaux. Les développeurs emploient alors des *métaphores avec ou sans substitution sensori-motrice*. Ces métaphores remplacent l'action souhaitée, souvent par une image symbolique. Par exemple, la téléportation d'un endroit à l'autre de l'environnement virtuel est une métaphore qui remplace le déplacement de l'utilisateur. Une métaphore avec substitution sensori-motrice exploite un sens spécifique qui est différent du sens stimulé dans l'action réelle ; par exemple, la collision entre deux objets est indiquée par un changement de couleur.

3.2. Méthodes d'évaluation de l'immersion et de l'interaction

À notre connaissance, il n'existe pas de métriques spécifiques à l'immersion et à l'interaction. Les auteurs considèrent qu'il existe des systèmes plus ou moins immersifs selon le type et le nombre de dispositifs qu'ils incluent (vision stéréoscopique, son spatialisé, retour d'effort) (Bowman & McMahan, 2007; Mujber et al., 2004), sans que l'on puisse toutefois évaluer leur degré d'immersion sur des critères objectifs. Par conséquent, les évaluations de l'immersion des applications de réalité virtuelle reposent sur des dimensions annexes comme la performance (e.g., Fang et al., 2014) ou le sentiment de présence (e.g., Frank Biocca, Kim, & Choi, 2001).

Nous relevons tout de même des exemples de questionnaires qui évaluent le réalisme des perceptions données par le système. Chertoff, Goldiez, et LaViola (2010) proposent un questionnaire pour évaluer l'expérience en réalité virtuelle, dans lequel ils intègrent des items en lien avec la fidélité sensorielle de l'application. Abate et al. (2009) intègrent des items relatifs au réalisme de la simulation visuelle et des retours haptiques d'un système pour la formation à la maintenance aéronautique.

De la même manière, les évaluations de l'interaction s'appuient sur des dimensions connexes, similaires à celles proposées pour évaluer l'immersion. Bowman (1998) propose des métriques de performance pour évaluer les techniques de déplacement (par exemple, en se dirigeant avec la direction du regard, par pointage, de façon continue ou en start et stop). Ces métriques comprennent entre autres le temps de réalisation de la tâche, la distance avec la position visée, ou encore l'apprenabilité. Les études comprennent également des évaluations de différentes techniques d'interaction en regard de leur utilisabilité (e.g., McMahan, Bowman, Zielinski, & Brady, 2012; Usoh et al., 1999)

Il est à noter que les recommandations MAUVE (Stanney et al., 2003), évoquées lorsque nous présentions l'utilisabilité de la réalité virtuelle, intègrent également des recommandations sur l'immersion et sur l'interaction. Pour l'immersion, les recommandations concernent les sorties visuelles (par exemple, le système doit avoir un taux de rafraîchissement élevé et une latence faible), les sorties auditives (par exemple, des sons en temps réel doivent être générés pour accentuer les actions de l'utilisateur) et les sorties haptiques (par exemple, les interactions haptiques doivent être fiables, intuitives et engendrer peu de fatigue). Pour l'interaction avec le système, les recommandations formulées concernent l'orientation dans l'environnement virtuel (par exemple, le système doit donner des informations autres que visuelles et auditives pour guider l'utilisateur), la navigation (par exemple, il doit être facile pour l'utilisateur de bouger et de se repositionner dans l'environnement virtuel) ainsi que la sélection et la manipulation d'objets (par exemple, la manipulation multimodale d'objet à deux mains doit être privilégiée).

Après cette brève synthèse des travaux sur l'interaction et sur l'immersion en réalité virtuelle, nous proposons de nous intéresser à une dimension qui mobilise de nombreux chercheurs et de nombreuses disciplines : il s'agit de la présence.

4. LA PRÉSENCE

4.1. Définitions de la présence

La présence est un concept central en réalité virtuelle. Nous tenterons ici d'établir une brève synthèse des nombreuses définitions existantes. Historiquement, les premières définitions de la présence proviennent d'une notion proche, celle de *téléprésence* (Draper, Kaber, & Usher, 1998). On attribue la première utilisation de ce terme à Minsky (1980), qui l'utilise pour décrire le sentiment associé aux situations de téléopération, c'est-à-dire aux situations où un opérateur est à distance de son lieu de travail et effectue une opération par le moyen d'une station de contrôle. Dans ce type de situations, les opérateurs peuvent avoir le sentiment d'être physiquement transportés ailleurs, à l'endroit où ils agissent à distance, plutôt qu'à l'endroit dans lequel ils se trouvent. C'est à ce sentiment que fait référence le terme de *téléprésence*.

Sheridan (1992) a ensuite repris cette notion et l'a distinguée de la présence virtuelle. Pour cet auteur, la téléprésence, tout comme l'avait défini Minsky (1980), renvoie au sentiment d'être physiquement présent sur le site où a lieu la téléopération, alors que la présence renvoie au sentiment d'être présent avec des objets générés par un ordinateur – de manière visuelle, auditive ou tactile.

Aujourd'hui, la définition la plus courante de la présence reste de celle de Lombard & Ditton (1997). Ils la conçoivent comme l'illusion perceptive de non-médiation. Ce sentiment survient lorsque l'utilisateur ne perçoit pas l'existence d'un intermédiaire dans sa communication avec un environnement virtuel. Il agit donc dans l'environnement virtuel comme il agirait sans intermédiaire. C'est sur cette définition de la présence que s'appuie la Société Internationale de la Recherche sur la Présence. Elle conçoit celle-ci comme le diminutif de *téléprésence* et la définit comme le sentiment *d'être* dans un environnement virtuel et plus généralement l'illusion de non-médiation ressentie par les utilisateurs qui ne s'aperçoivent pas du rôle de la technologie dans leur expérience (International Society for Presence Research, 2000).

Certains auteurs distinguent la notion de présence de celle d'immersion. Pour Witmer et Singer (1998), la présence est définie comme « *l'expérience subjective d'être à un endroit ou dans un environnement, même lorsque l'on est physiquement situé dans un autre* » (notre traduction, p. 225), alors que l'immersion est définie comme « *un état psychologique caractérisé par le fait de se percevoir enveloppé, inclus et en interaction avec un environnement qui fournit un flux continu de stimuli et d'expériences* » (notre traduction, p. 227). La présence et l'immersion sont alors considérées comme deux états psychologiques. Par ailleurs, l'immersion, avec l'engagement de l'utilisateur, est nécessaire à l'émergence de la présence.

Slater (1999) s'oppose à cette conception. Pour lui, la présence est subjective, alors que l'immersion est objective. La présence renvoie au sentiment, subjectif donc, *d'être* dans un environnement virtuel, tandis que l'immersion est une caractéristique de la technologie : elle renvoie au degré avec lequel la technologie est capable de donner une illusion de réalité aux sens de l'utilisateur (Slater & Wilbur, 1997). Mestre et Fuchs (2006) s'accordent sur ces définitions de Slater. Pour eux, l'immersion renvoie « à une description des caractéristiques objectives d'un dispositif de réalité virtuelle » alors que la présence renvoie à « l'effet que cette immersion produit sur le comportement du sujet » (p. 309).

Certains auteurs ont également distingué différents types de présence. Ainsi, Heeter (1992) décrit :

- une *présence personnelle*, qui renvoie au degré avec lequel l'utilisateur a le sentiment qu'il se situe dans un monde virtuel ;
- une *présence sociale*, qui est définie comme le degré avec lequel l'utilisateur a le sentiment que les autres personnes (réelles ou virtuelles) existent aussi dans le monde virtuel et interagissent avec lui ;
- une *présence environnementale*, qui renvoie au degré avec lequel l'environnement semble reconnaître l'existence de l'utilisateur et réagir face à lui.

Cette typologie en trois dimensions se retrouve chez d'autres auteurs. Dans une conception proche, Biocca (1997) distingue :

- la *présence physique*, qui renvoie à la sensation d'être physiquement présent dans l'environnement virtuel ;
- la *présence sociale*, qui correspond à l'impression d'être dans l'environnement virtuel avec d'autres, d'accéder à leur intelligence, à leurs intentions et à leurs sens ;
- la *présence de soi (self presence)*, qui correspond à l'effet de l'immersion sur l'utilisateur, sur la perception qu'il a de son corps, sur ses états émotionnels, sur son identité, etc.

En s'appuyant sur les définitions et les taxonomies de la présence précédemment proposées, Lee (2004) décrit trois types de présence. Il utilise une dénomination semblable à la taxonomie de Biocca (1997), mais il définit différemment ces trois types de présence. Pour lui :

- la *présence physique* correspond à un état psychologique lors duquel les objets virtuels sont perçus comme réels ;
- la *présence sociale* renvoie à l'état psychologique dans lequel les personnes virtuelles sont perçues comme de véritables acteurs sociaux ;

- la *présence de soi* réfère à l'état psychologique dans lequel l'utilisateur perçoit son avatar comme son véritable soi.

Nous avons résumé ici les principales définitions et les principales taxonomies de la présence. Nous proposons dans la prochaine partie de présenter les méthodes d'évaluation.

4.2. Méthodes d'évaluation de la présence

Deux types de méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la présence : des méthodes subjectives et des méthodes objectives (Mestre & Fuchs, 2006; Schuemie, van der Straaten, Krijn, & van der Mast, 2001; Thornson, Goldiez, & Le, 2009). Les méthodes subjectives sont les plus répandues. Elles s'appuient sur une évaluation introspective de la présence au moyen de questionnaires (Schuemie et al., 2001), les plus connus étant :

- le *Presence Questionnaire* (PQ) de Witmer et Singer (1998) ;
- le questionnaire de présence de Slater, Usoh, et Steed (1994) ;
- l'*Independant Television Commission Sense of Presence Inventory* (ITC-SOPI) de Lessiter, Freeman, Keogh, et Davidoff (2001) ;
- l'*Igroup Presence Questionnaire* de Schubert, Friedmann, et Regenbrecht (2001).

Pour illustrer ces méthodes, nous présenterons brièvement chacun de ces questionnaires et surtout les dimensions qu'ils évaluent. D'abord, le questionnaire de présence de Witmer & Singer (1998) s'appuie sur leur définition de la présence présentée précédemment, en termes d'engagement et d'immersion. L'outil proposé est composé de quatre facteurs (Witmer, Jerome, & Singer, 2005) :

- *l'engagement*, défini comme l'état psychologique qui résulte du fait pour l'utilisateur de fixer son attention sur un ensemble cohérent de stimuli ou sur une activité ou un évènement donné ;
- *la qualité de l'interface*, qui renvoie à la qualité perçue de l'interface et au degré avec lequel l'utilisateur juge qu'elle interfère avec ses activités ;
- *l'adaptation/l'immersion*, qui correspond à la manière dont l'utilisateur juge sa maîtrise de l'environnement virtuel et la rapidité avec laquelle il s'est adapté à l'expérience ;
- *la fidélité visuelle*, définie comme le degré avec lequel l'environnement virtuel permet une recherche visuelle active ou l'examen visuel rapproché des objets.

Dans le même article, en plus de ce questionnaire, Witmer et Singer ont développé un second outil. Il permet d'évaluer la propension à l'immersion des utilisateurs, en partant du postulat que certains utilisateurs ressentent plus facilement un sentiment de présence que d'autres. Les résultats de ce questionnaire, l'ITQ (*Immersive Tendency Questionnaire*) sont positivement corrélés aux résultats du questionnaire de présence qu'ils ont développé (Witmer & Singer, 1998).

Slater et al. (1994) ont proposé un autre questionnaire pour évaluer la présence. En considérant la présence comme un état psychologique, ils proposent une évaluation courte en trois items. Le premier évalue la sensation d'être ailleurs (*being there*). Le second mesure le degré avec lequel les participants jugent que le monde virtuel dans lequel ils ont navigué était davantage réel que le monde réel dans lequel avait lieu l'expérience. Le troisième item évalue le degré avec lequel les

participants ont perçu l'environnement virtuel davantage comme un endroit visité que comme des images qu'ils auraient visionnées.

Le questionnaire ITC-SOPI (*l'Independent Television Commission Sense of Presence Inventory*) de Lessiter et al. (2001) est transmédias : l'objectif étant de posséder un outil qui pourrait aussi bien s'appliquer au cinéma et à la télévision haute définition qu'aux environnements virtuels. Il est construit autour de quatre facteurs :

- *le sentiment d'un espace physique*, qui renvoie à la présence physique, c'est-à-dire à la sensation d'être ailleurs et d'être en interaction et de contrôler certains éléments de l'environnement virtuel ;
- *l'engagement*, qui renvoie à la tendance à être psychologiquement engagé et à apprécier le contenu de l'expérience ;
- *la validité écologique*, c'est-à-dire la tendance à percevoir l'environnement projeté comme réel ;
- les effets négatifs, notamment les nausées, les maux de tête et la fatigue visuelle.

Nous finirons par le questionnaire de Schubert et al. (2001), issu de l'Igroup. L'Igroup est un consortium multidisciplinaire qui s'intéresse aux interfaces entre les humains et les environnements virtuels. Le questionnaire développé par ce consortium est composé d'items provenant de questionnaires existants et d'items élaborés par les auteurs. On trouve, entre autres, des items issus du questionnaire de présence de Witmer et Singer (1998) ou encore du questionnaire de Slater et al. (1994). Les auteurs s'appuient sur la distinction de Slater entre présence et immersion et extraient huit facteurs de leur questionnaire : trois facteurs pour la présence et cinq pour l'immersion. Pour l'immersion, les dimensions évaluées sont les suivantes :

- *la qualité de l'immersion*, qui renvoie à ce que Steuer (1992) qualifie d'*intensité (vividness)*, c'est-à-dire la capacité d'une technologie à produire un environnement sensoriellement riche ;
- *le scénario*, qui renvoie au degré avec lequel la qualité du scénario auquel l'utilisateur participe peut s'apparenter à celui d'un livre ou d'un film ;
- *la conscience de l'interface*, qui renvoie aux distractions générées par l'interface ;
- *l'exploration de l'environnement virtuel*, qui renvoie à la facilité avec laquelle l'utilisateur peut explorer l'environnement virtuel ;
- *la prévisibilité de l'interaction*, qui renvoie au degré avec lequel l'interaction avec l'environnement virtuel entraîne des résultats prévisibles.

Pour la présence, les trois dimensions évaluées par ce questionnaire sont les suivantes :

- *la présence spatiale*, qui renvoie à la définition la plus générale de la présence, c'est-à-dire au sentiment d'être ailleurs ;
- *l'engagement*, qui correspond à l'attention que l'utilisateur dirige vers l'environnement virtuel, ou, au contraire, vers l'environnement physique ;
- *le réalisme*, qui renvoie au jugement de l'utilisateur sur le réalisme de l'environnement virtuel, en le comparant à l'environnement physique qu'il représente.

Les questionnaires que nous venons de présenter servent d'évaluations subjectives de la présence : ce sont les utilisateurs qui s'expriment, à travers des

échelles de mesure, sur le degré de présence qu'ils ont ressenti dans une expérience en réalité virtuelle, *a posteriori*. Ces questionnaires ont l'avantage de fournir des mesures systématisées de la présence, et ce sur plusieurs dimensions. Toutefois, nous aimerions pointer quelques limites à ces outils. Premièrement, puisque les mesures sont prises après l'immersion, on pourrait avancer qu'ils reposent davantage sur la mémorisation de la sensation qu'a ressentie l'utilisateur que sur son sentiment de présence, tel qu'il l'a ressenti. Par ailleurs, la présence est évaluée en un seul score, ce qui omet totalement son caractère continu, fluctuant et les ruptures de présence qui peuvent survenir lors d'une expérience. Pour ces raisons, il est possible d'avoir recours à des mesures objectives de la présence, qui présentent l'avantage de ne pas reposer sur les jugements de l'utilisateur et de pouvoir être réalisées *pendant* l'immersion. Ces mesures objectives sont de deux types : les mesures physiologiques et les mesures comportementales (Schuemie et al., 2001).

Les mesures physiologiques permettent d'évaluer les réactions physiologiques de l'individu lors d'une expérience en réalité virtuelle, en partant du postulat que s'il ressent un sentiment de présence fort, il devrait réagir physiologiquement de la même manière qu'il le ferait dans l'environnement réel. Les mesures physiologiques comprennent le rythme cardiaque, la conductance de la peau, la pression artérielle, la tension musculaire, le rythme respiratoire, etc. (Thornson et al., 2009). Par exemple, dans une expérience portant sur des situations sociales en environnement virtuel immersif, Slater et al. (2006) ont mesuré le rythme cardiaque et la conductance cutanée des participants en lien avec les énonciations des personnages virtuels. De la même manière, dans une étude comparant un environnement virtuel stressant (un précipice virtuel) à un environnement virtuel sans danger, Meehan, Insko, Whitton, & Brooks (2002) ont relevé une augmentation du rythme cardiaque et, dans une moindre mesure, de la conductance cutanée des participants.

Les mesures comportementales visent à effectuer des comparaisons entre le comportement adopté par un individu dans un environnement virtuel et le comportement qu'il adopterait en environnement réel. Les comportements observés sont variés. Par exemple, Sheridan (1996) propose de prendre en compte des réponses dites « réflexes », telles qu'essayer d'attraper une balle, éviter un projectile ou s'excuser en bousculant un personnage virtuel. Par ailleurs, Slater, Usoh, et Chrysanthou (1995) ont fait varier la position d'un objet dans l'environnement virtuel pour effectuer des mesures comportementales. Une radio était à la fois présente dans le monde réel et dans le monde virtuel, mais à des endroits différents. Alors que dans l'environnement virtuel, la radio restait à la même place, dans l'environnement réel, elle était déplacée plusieurs fois et mise en marche. Par conséquent, le participant entendait le son de la radio venir d'endroits différents bien que virtuellement l'objet ne change pas de place. Les auteurs se sont intéressés à l'endroit pointé par les participants lorsqu'ils leur demandaient où se trouvait la radio (sans préciser s'il s'agissait de la radio de l'environnement virtuel ou de l'environnement réel).

Cette partie consacrée à la présence nous a permis de présenter une partie des travaux effectués sur cette dimension et sur ses méthodes d'évaluation. Elle est considérée comme un effet positif de l'exposition à un environnement virtuel, effet recherché par les concepteurs (Kober & Neuper, 2013; Thornson et al., 2009). Dans la prochaine partie, nous nous attarderons sur une seconde conséquence de l'exposition à un environnement virtuel, négative cette fois-ci : il s'agit du mal des environnements virtuels.

5. LE MAL DES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS

5.1. Définition du mal des environnements virtuels

Certaines personnes présentent des symptômes suite à leur exposition à des environnements virtuels, tels que de la fatigue visuelle, de la pâleur, de la désorientation, de la transpiration, des maux de tête, etc. (Cobb, Nichols, Ramsey, & Wilson, 1999; LaViola, 2000). Ils sont désignés par différentes appellations (Rebenitsch & Owen, 2016) : on parle en anglais de *cybersickness*, de *simulator sickness*, de *Virtual Induced Motion Sickness (VIMS)*, de *Virtual Reality Symptoms and Effects (VRISE)*, etc. En français, le terme de *mal des simulateurs* a été proposé (Burkhardt, 2003). Il existe des confusions entre le mal des environnements virtuels, le mal des transports et le mal des simulateurs. Pourtant, il existe des différences entre ces syndromes.

Premièrement, l'origine et le profil des symptômes distinguent le mal des environnements virtuels du mal des transports. Alors que pour le mal des transports, le déplacement du véhicule est à l'origine des symptômes, les symptômes du mal des environnements virtuels ne proviennent pas d'un mouvement physique, on dit qu'ils sont induits visuellement (Cobb et al., 1999). Concernant leurs profils de symptômes, pour le mal de mer, la nausée est prédominante, suivie des troubles oculomoteurs et dans une moindre mesure de la désorientation alors que pour le mal des environnements virtuels la désorientation est le type de symptôme prédominant, suivi par la nausée et dans une moindre mesure par les troubles oculomoteurs (Tableau 1) (Rebenitsch & Owen, 2016).

De la même manière, les profils de symptômes diffèrent entre les simulateurs de conduite et les environnements virtuels (Tableau 1). L'exposition à des simulateurs entraîne majoritairement des troubles oculomoteurs, suivis par de la nausée et dans une moindre mesure de la désorientation (Stanney, Kennedy, & Drexler, 1997).

Tableau 1. *Profil des symptômes du mal des transports, du mal des simulateurs et du mal des environnements virtuels (adapté de Rebenitsch & Owen, 2016)*

	Mal de mer	Mal des simulateurs	Mal des environnements virtuels
Symptômes les plus sévères	Nausée	Troubles oculomoteurs	Désorientation
Symptômes moyennement sévères	Troubles oculomoteurs	Nausée	Nausée
Symptômes les moins sévères	Désorientation	Désorientation	Troubles oculomoteurs

En nous appuyant sur les différences ainsi pointées, et pour ne pas relayer davantage de confusion autour de ces syndromes, nous choisissons d'employer les termes de « mal des environnements virtuels » ou la désignation anglaise *cybersickness* pour désigner les symptômes qui accompagnent ou qui font suite à une exposition à un environnement virtuel.

Ces symptômes sont relativement courants, bien que les études qui rapportent le taux d'utilisateurs présentant ces symptômes soient rares. Regan (1997) a tenté de mesurer la fréquence des symptômes de mal des environnements virtuels : elle relève que 60% des participants de son étude ont présenté des symptômes pendant les 20 minutes d'immersion et 10 minutes après immersion. Dans l'étude de Cobb et al. (1999), 80% des participants ont présenté des symptômes dans les 10 minutes suivant leur exposition.

Différentes explications ont été proposées au mal des simulateurs. Quatre théories expliquant ce phénomène sont répandues dans la littérature (Rebenitsch & Owen, 2016). La théorie la plus courante explique les symptômes par un *décalage sensoriel* entre les stimuli de l'environnement extérieur et ce qui est perçu par les sens de l'utilisateur. Par exemple, un utilisateur peut se sentir malade s'il se voit assis dans un manège dévalant à pleine vitesse des montagnes russes (dans l'environnement virtuel) alors que son système vestibulaire (dans le monde physique) ne perçoit pas de changement. Une deuxième théorie explique ces mêmes symptômes par l'*instabilité posturale*. Par exemple, si les changements de posture de l'utilisateur dans le monde physique n'ont pas de répercussion dans l'environnement virtuel, il peut avoir une posture instable dans le monde physique sans en être conscient. Dans cette théorie, l'instabilité posturale est à l'origine des symptômes : elle explique que plus la posture de l'utilisateur est instable, plus il est malade. Cette théorie a gagné en popularité dans la littérature, car il est possible de procéder à des évaluations objectives des changements posturaux de l'utilisateur lors de son utilisation de la réalité virtuelle. Une troisième théorie repose sur la direction que l'utilisateur perçoit comme le haut. Cette direction peut être différente entre ce que l'utilisateur perçoit comme le haut dans l'environnement virtuel et ce qui est le haut dans le monde physique, en référence donc à la gravité. Dans ce cas, on suppose qu'un utilisateur qui expérimente un décalage entre la gravité telle que son corps la ressent dans le monde physique et la gravité telle qu'il la perçoit dans l'environnement virtuel sera malade. Cette théorie est dite du *cadre de référence (rest frame)*. Enfin, une quatrième explication est très souvent citée, bien qu'elle ne s'applique pas au mal des environnements virtuels. Elle explique que les symptômes pourraient s'expliquer par l'effet d'un poison ingéré dans le passé et que les symptômes de nausée résultent d'un mécanisme de survie inadapté.

Dans la littérature, en plus de ces théories explicatives, différents facteurs qui contribuent au mal des simulateurs ont été identifiés. LaViola (2000) en a identifié certains dans une revue de la littérature. Il relève des effets :

- du genre (les femmes sont plus sensibles que les hommes) ;
- de l'âge (les enfants entre 2 et 12 ans sont plus touchés que les adultes),
- de l'état de santé (les risques de présenter des symptômes augmentent lorsque les individus sont malades ou fatigués) ;
- de la posture de l'utilisateur (la position assise est celle qui entraîne le moins de symptômes).

Il relève par ailleurs certains facteurs relatifs aux technologies qui peuvent contribuer à l'émergence de symptômes de mal des environnements virtuels, tels que :

- des erreurs dans la capture de la position de l'utilisateur ;
- le *lag*, c'est-à-dire le temps séparant l'action de l'utilisateur et sa conséquence dans l'environnement virtuel ;

- le clignotement, qui peut être diminué en augmentant le rafraîchissement de l'image.

Certaines études montrent une variabilité entre les dispositifs. Sharples, Cobb, Moody, et Wilson (2008) ont comparé les symptômes faisant suite à l'utilisation de quatre types de dispositifs : un visio-casque, un ordinateur, un écran de projection et un écran de cinéma 3D. Les résultats de cette étude montrent que le visio-casque est le dispositif qui entraîne le plus de symptômes de nausée et de désorientation. Aucune différence significative entre les dispositifs n'a été relevée pour les troubles oculomoteurs.

Des études plus récentes portent spécifiquement sur l'effet des visio-casques sur le mal des environnements virtuels. Moss et Muth (2011) ont testé la variation de certaines caractéristiques des casques sur les symptômes de mal des environnements virtuels évalués par le SSQ⁴. L'augmentation du délai d'affichage de 200 ms n'a pas d'effet sur les symptômes. L'échelle de l'image, c'est-à-dire le ratio entre le champ de vision dans l'environnement virtuel et celui affiché dans le visio-casque, n'a pas d'effet non plus sur les symptômes. En revanche, les auteurs montrent une augmentation des symptômes lorsque la vision périphérique des utilisateurs est gênée.

La commercialisation de visio-casques au grand public a débouché sur des études spécifiques à certains modèles de casques. Certaines études s'intéressent de manière ciblée aux effets de l'Oculus Rift. L'étude de Munafo, Diedrick, et Stoffregen (2017) montre que ce casque entraîne des symptômes du mal des environnements virtuels et que ces symptômes touchent davantage les femmes que les hommes. Une étude sur le même casque de Serge et Moss (2015) montre que les symptômes augmentent avec la durée d'utilisation. Les auteurs ne relèvent par ailleurs aucune différence significative dans les symptômes entre une tâche de navigation et une tâche d'observation. L'étude intégrait également l'instabilité corporelle des participants. Ils ont relevé que les participants qui présentaient des balancements avant l'exposition étaient ceux qui présentaient des symptômes après l'exposition à l'environnement virtuel. Ces résultats vont donc dans le sens de la théorie de l'instabilité posturale.

Suite aux études sur le mal des environnements virtuels, différentes recommandations ciblées sur la conception des visio-casques ont été formulées afin de réduire le mal des environnements virtuels (Porcino, Clua, Vasconcelos, Trevisan, & Valente, 2016). Ces recommandations concernent, par exemple, le degré de contrôle, la durée d'utilisation, ou encore la latence.

Différentes méthodes existent pour évaluer le mal des environnements virtuels. Il s'agit principalement de questionnaires que nous présenterons dans la partie suivante.

5.2. Méthodes d'évaluation du mal des environnements virtuels

Aujourd'hui, le SSQ (*Simulator Sickness Questionnaire*, Kennedy & Lane, 1993) est le questionnaire le plus utilisé pour évaluer le mal des simulateurs (Rebenitsch & Owen, 2016). Il se compose de 16 symptômes présentés avec des

⁴ Nous présentons ce questionnaire dans la partie suivante consacrée aux méthodes d'évaluation du mal des environnements virtuels.

échelles en 4 points. Les répondants doivent indiquer dans quelle mesure ils présentent le symptôme mentionné. L'échelle s'étend de 0 (*pas du tout*) à 3 (*sévèrement*). L'analyse factorielle de Kennedy et Lane (1993) a permis d'identifier trois catégories de symptômes :

- des symptômes de nausée : nausée, transpiration, augmentation de la salivation, etc. ;
- des troubles oculomoteurs : maux de tête, fatigue visuelle, vision floue, etc. ;
- de symptôme de désorientation : difficulté à se concentrer, à focaliser son attention, etc.

Plus récemment, d'autres outils ont été proposés. Par exemple, Keshavarvz et Hecht (2011) ont développé un outil permettant de quantifier le *motion sickness*, que l'on traduit généralement en français par « mal des transports ». Cet outil peut donc être utilisé à la fois pour des environnements réels et des environnements virtuels, et cela verbalement *lors* de l'exposition. Kim, Park, Choi, & Choe (2018) ont également développé un autre questionnaire, le VRSQ (pour *Virtual Reality Sickness Questionnaire*), qui est une version révisée du SSQ adaptée spécifiquement à la réalité virtuelle.

SYNTHÈSE DU CHAPITRE 2

Dans ce chapitre, nous avons résumé la contribution de l'ergonomie à l'interaction homme – réalité virtuelle autour de différentes dimensions. Nous avons commencé par **l'utilité** et **l'utilisabilité**, qui sont considérées comme les dimensions les plus centrales en ergonomie informatique (Burkhardt & Sperandio, 2004). Nous avons ensuite traité de dimensions spécifiques à l'interaction avec la réalité virtuelle : **l'interaction et l'immersion**, la **présence** et le **mal des environnements virtuels**. Pour chacune des dimensions présentées, nous avons donné des éléments de **définition**, puis nous avons synthétisé les **méthodes** utilisées, d'abord de manière générale, ensuite plus spécifiquement pour la réalité virtuelle. Le Tableau 2 résume les aspects centraux des définitions données, ainsi que les méthodes d'évaluation de chacune de ces dimensions.

Tableau 2. Synthèse des dimensions étudiées en ergonomie dans l'interaction homme-réalité virtuelle et des méthodes employées

Dimension	Éléments de définition	Méthodes d'évaluation pour la réalité virtuelle
Utilisabilité	« Facilité d'utilisation » Efficacité, efficience, satisfaction, apprenabilité, mémorisation (Brangier & Barcenilla, 2003 ; Shackel, 1991)	Avec la participation des utilisateurs (enquêtes d'usage, tests utilisateurs) ou par inspections basées sur les interfaces (selon des normes, des guides de style et des recommandations ergonomiques)
Utilité	Utilité-destination et utilité-valeur (Loup-Escande et al., 2013)	Utilité-destination : efficacité de la technologie pour répondre à un objectif donné Utilité-valeur : par comparaison à d'autres outils
Immersion	Capacité du système à renvoyer aux sens humains une illusion inclusive, extensive, environnante et riche (Slater & Wilbur, 1997)	Pas de métriques spécifiques Les auteurs considèrent qu'il existe des systèmes plus ou moins immersifs selon le type et le nombre de dispositifs qu'ils incluent (vision stéréoscopique, son spatialisé, retour d'effort) (Bowman et al., 2007 ; Mujber et al., 2004) Dimensions connexes (par exemple, performance, présence)

(suite du tableau à la page suivante)

Dimension	Éléments de définition	Méthodes d'évaluation pour la réalité virtuelle
Interaction	Communication entre l'utilisateur et la technologie par le biais de dispositifs d'entrée et de sortie (Jerarld, 2016)	Pas de métriques spécifiques Dimensions connexes (par exemple, performance, utilisabilité)
Présence	Sentiment d'être dans l'environnement virtuel (Slater & Wilbur, 1997) ; illusion perceptive de non-médiation (Lombard & Ditton, 1997)	Méthodes objectives (rythme cardiaque, conductance de la peau, comportements, etc.) et méthodes subjectives (principalement des questionnaires)
Mal des environnements virtuels	Symptômes suivant une exposition à un environnement virtuel (fatigue visuelle, maux de tête, etc.)	Principalement des questionnaires sur différents symptômes, plus rarement méthodes objectives (rythme cardiaque, pression artérielle, etc.)

L'implantation des technologies de réalité virtuelle dans différents domaines d'activité (éducation, formation professionnelle, conception de produit, etc.) soulève d'importantes questions pour les ergonomes et pour les psychologues du travail, notamment sur les changements organisationnels, sur les modifications des activités, sur les impacts sur la santé, sur les compétences, etc.

Dans ce chapitre, nous avons abordé différentes dimensions qui permettent d'étudier (et de concevoir ou d'améliorer) les interactions entre la réalité virtuelle et ses utilisateurs. L'introduction de la réalité virtuelle pose également la question de son adoption ou de son rejet par les individus. Cette question, résumée par la notion d'acceptabilité des technologies, fera l'objet de notre prochain chapitre.

CHAPITRE 3. LES APPROCHES THÉORIQUES ET MÉTHODOLOGIQUES DE L'ACCEPTABILITÉ DES TECHNOLOGIES

Plusieurs termes gravitent autour de la notion d'acceptabilité, par exemple l'acceptation, l'adoption ou encore l'intention d'usage. Nous proposons ici une définition de ces différentes notions, qui guidera l'utilisation de l'un ou l'autre de ces termes dans la suite du texte.

Pour Bobillier Chaumon et Dubois (2009), il existe un *continuum* entre acceptabilité et acceptation (Figure 3). L'acceptabilité renvoie aux « représentations des personnes face à une technologie future ou possible » (Bobillier Chaumon & Dubois, 2009, p. 356), alors que l'acceptation « se focalise plus sur le vécu des personnes lors et suite à l'introduction des TIC⁵ » (Bobillier Chaumon et Dubois, 2009, p. 356).



Figure 3. Continuum acceptabilité-acceptation (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009)

Terrade, Pasquier, Boulanger, Guingouain, et Somat (2009) décrivent également l'acceptabilité comme un continuum temporel, mais cette fois en trois phases. Comme pour Bobillier-Chaumon et Dubois, l'acceptabilité concerne ici les représentations d'un individu sur une technologie qu'il n'a pas (encore) utilisée. En revanche, l'acceptation renvoie aux premières utilisations de la technologie par l'utilisateur, elle est ensuite suivie d'une phase *d'appropriation*, qui renvoie au moment où la technologie est intégrée dans le fonctionnement ordinaire de l'individu et où l'on peut observer des phénomènes de détournement d'usage ou de contentement.

L'*adoption technologique* est une autre notion voisine de l'acceptabilité des technologies. Cette notion est plus générale que celle d'acceptabilité, d'acceptation ou d'appropriation, que nous avons mentionnées précédemment, puisque l'on désigne par *adoption* la décision d'utiliser une technologie (Hameed, Counsell, & Swift, 2012 ; Rogers, 1995). Le terme est également parfois utilisé pour désigner de façon globale l'ensemble du *continuum* que nous décrivions précédemment (Bobillier Chaumon & Dubois, 2009; Brangier, Dufresne, & Hammes-Adelé, 2009). Par ailleurs, nous distinguerons la *décision* d'utiliser de *l'intention* de le faire. En effet, la décision a un caractère définitif et assuré (CNRTL, n.d.-a), alors que l'intention peut être incertaine et les conditions peuvent ne pas être précisées (CNRTL, n.d.-b). Par conséquent, nous distinguerons *l'adoption*, qui correspond à la décision d'utiliser une technologie, des *intentions d'usage*, plus incertaines. Il est à noter que dans la suite de cet état de l'art nous verrons que les intentions d'utiliser une technologie sont centrales dans les modèles d'acceptabilité des technologies.

⁵ TIC : Technologies de l'Information et de la Communication

Nous résumerons les différentes terminologies présentées de la manière suivante :

- l'acceptabilité est la première phase du processus d'acceptation des technologies, elle renvoie aux représentations des utilisateurs sur une technologie future ;
- l'acceptation correspond, dans une conception stricte, aux premières utilisations de la technologie (Terrade et al., 2009) et, de manière plus large, à l'expérience réelle des utilisateurs avec la technologie (Bobillier Chaumon & Dubois, 2009) ;
- l'appropriation⁶ correspond au moment où la technologie est intégrée dans les activités de l'individu et on l'on peut observer des détournements d'usage et des phénomènes de contentement ;
- l'adoption décrit de manière large la décision d'adopter une technologie ;
- l'intention d'usage correspond à la motivation d'utiliser une technologie sans certitude sur l'utilisation effective et sur les conditions de l'utilisation.

L'étude de l'acceptabilité des technologies a pour but de déterminer les raisons du rejet ou de l'adoption d'une technologie par les individus. Elle cherche également à prédire son utilisation. En d'autres termes, elle vise à « évaluer et/ou prédire les conditions et les motifs qui peuvent rendre une technologie acceptable, ou non, par les futurs usagers » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 6). Cette question a été traitée à travers plusieurs approches scientifiques, variées, complémentaires, voire contradictoires (Brangier et al., 2010).

Deux approches ont d'abord été distinguées par Nielsen (1993) : d'une part, l'acceptabilité pratique (ou opératoire), qui renvoie classiquement à l'utilité et à la facilité d'utilisation d'une technologie ; d'autre part, l'acceptabilité sociale, qui renvoie aux perceptions et aux attitudes vis-à-vis d'une technologie. Une troisième approche a été proposée par Bobillier Chaumon (2013) afin de compléter les deux précédentes : l'acceptation située. Nous consacrerons ce chapitre à la présentation de ces trois approches, des méthodes qu'elles mobilisent ainsi qu'à la synthèse de leurs apports et de leurs limites.

1. L'ACCEPTABILITÉ PRATIQUE : CONCEVOIR UNE INTERACTION OPTIMALE ENTRE L'UTILISATEUR ET LA TECHNOLOGIE

L'approche centrée sur l'acceptabilité pratique (ou opératoire) cherche à assurer l'adéquation entre l'utilisateur, ses tâches et la technologie (Brangier et al., 2010). Cette approche considère qu'une technologie acceptable est une technologie dont l'interaction avec l'utilisateur est optimale. L'interaction homme-machine est donc au cœur des études qui s'inscrivent dans cette approche. Pour répondre à cet objectif, différentes dimensions sont intégrées. Nous les présenterons en deux catégories : d'une part, les dimensions instrumentales et, d'autre part, les dimensions non-instrumentales.

1.1. Des dimensions instrumentales

On qualifie de *dimensions instrumentales* ou de *qualités pragmatiques* les caractéristiques d'une technologie qui renvoient à la réalisation de tâches par

⁶ Nous consacrerons une partie de cet état de l'art à la question de l'appropriation des technologies et à la manière dont les utilisateurs les transforment.

l'utilisateur (Hassenzahl, Platz, Burmester, & Lehner, 2000). À l'inverse, on parle de *dimensions non-instrumentales* pour qualifier les dimensions qui renvoient à des qualités de la technologie qui ne sont pas orientées vers la réalisation de la tâche, mais vers l'utilisateur, par exemple l'originalité, le plaisir ou encore l'esthétisme (Diefenbach, Kolb, & Hassenzahl, 2014; Hassenzahl et al., 2000).

L'approche centrée sur l'acceptabilité pratique se centre principalement sur les dimensions instrumentales des technologies, notamment sur l'utilité et sur l'utilisabilité (Bobillier Chaumon, 2013; Brangier et al., 2010).

Le modèle de l'acceptabilité de Nielsen (1993) postule que l'acceptabilité d'un système dépend de son acceptabilité sociale, d'une part, et de son acceptabilité pratique, d'autre part. L'acceptabilité sociale est peu développée par ce modèle ; Nielsen met l'accent sur l'acceptabilité pratique de la technologie (Figure 4). Il la définit par l'intermédiaire de différents critères : son utilité pratique, son coût, sa compatibilité, sa fiabilité et d'autres dimensions qu'il ne précise pas. L'utilité pratique de la technologie correspond à ce qu'elle permet effectivement de faire. Elle dépend de son utilité théorique, qui renvoie à ce qu'elle est censée permettre de faire, et à son utilisabilité. L'utilisabilité renvoie aux différents critères que nous avons exposés dans la partie de cet état portant sur l'utilisabilité des technologies. Elle comprend la facilité à apprendre (l'apprenabilité), l'efficacité, la mémorisation, la prévention des erreurs et le sentiment de satisfaction.

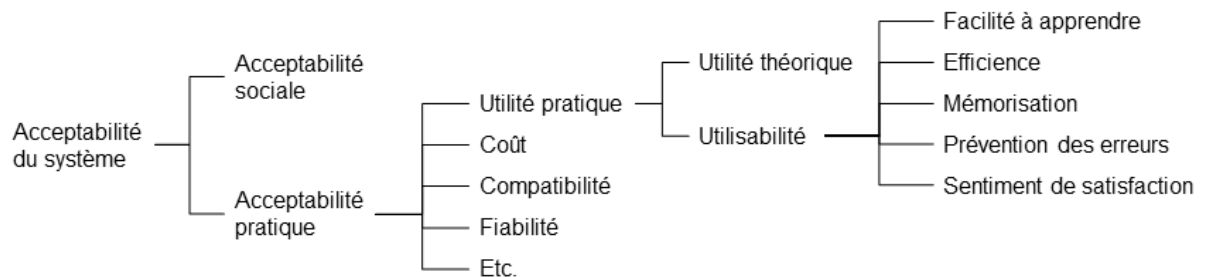


Figure 4. Modèle de l'acceptabilité de Nielsen (1993), traduction de Tricot et al. (2003)

De la même manière, dans le modèle P3, Dillon & Morris (1999) expliquent l'utilisation d'une technologie par trois dimensions :

- le Pouvoir de l'outil, qui renvoie à son utilité ;
- la Performance des utilisateurs, qui renvoie à l'utilisabilité de la technologie ;
- les Perceptions des utilisateurs.

Ce modèle, comme le précédent, met donc l'accent sur l'utilité et l'utilisabilité de la technologie pour expliquer son utilisation (Figure 5).

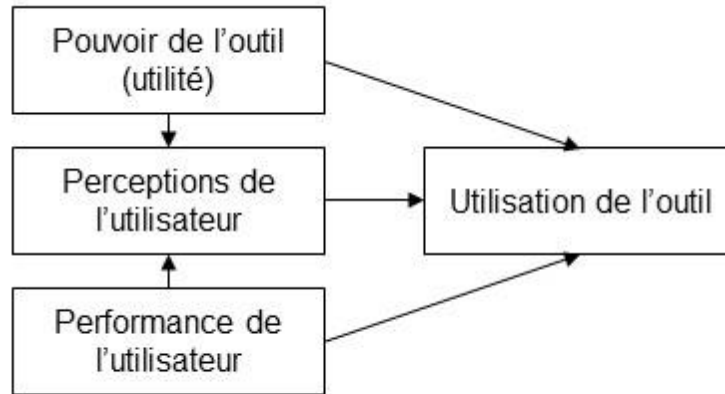


Figure 5. Modèle P3 (Pouvoir, Perceptions, Performance) de Dillon & Morris (1999), notre traduction

En plus de ces modèles qui traitent explicitement de l'acceptabilité des technologies, de nombreux travaux ont traité indirectement cette question en se focalisant sur différents critères pour concevoir des interactions entre les utilisateurs et les technologies de bonne qualité ou en les améliorant. Ces critères sont variés : ils comprennent l'utilité et l'utilisabilité évoquées dans les paragraphes précédents, mais également l'accessibilité, la fiabilité, etc. Ce qu'il faut retenir de ces travaux c'est qu'ils tentent, en s'appuyant sur différents critères, d'assurer la comptabilité entre l'utilisateur et le système dans la réalisation de ses tâches. Néanmoins, on assiste à une évolution dans les paradigmes, avec des recherches qui intègrent, en plus des dimensions instrumentales, des dimensions non-instrumentales (Barcenilla & Bastien, 2009).

1.2. Des dimensions non-instrumentales

Comme nous l'expliquions précédemment, les dimensions non-instrumentales ne sont pas directement liées à la réalisation de la tâche. Elles concernent par exemple l'apparence de la technologie, ou encore le plaisir et les émotions ressentis par l'utilisateur. Nous présenterons ici quelques exemples de ces dimensions, notre objectif étant d'illustrer comment la prise en compte de ces dimensions vise à favoriser l'acceptabilité pratique des technologies. Nous commencerons par le concept large d'expérience utilisateur en présentant différents modèles proposés. Puis, nous présenterons des dimensions plus restreintes telles que les émotions, le plaisir, le flow ou encore la beauté.

L'approche centrée sur l'expérience utilisateur (ou UX pour *User eXperience*) témoigne de l'intérêt de la recherche pour les dimensions non-instrumentales. Cette approche s'intéresse à l'expérience (au sens large) de l'utilisateur dans son interaction avec la technologie. Elle intègre des dimensions instrumentales ainsi que des dimensions non-instrumentales (émotionnelles, expérientielles, affectives, hédoniques, etc.). Elle se veut plus large que l'approche centrée sur l'utilisabilité, qui se focalise sur la cognition et la performance de l'utilisateur. Différentes définitions de l'UX ont été données sans qu'il n'existe vraiment de cadre unique et consensuel (Law, Roto, Hassenzahl, Vermeeren, & Kort, 2009). Il existe différentes approches de l'UX dont les points de vue disciplinaires, conceptuels et méthodologiques varient (Barcenilla & Bastien, 2009). Les termes d' « expérience utilisateur » sont donc plutôt

à considérer de façon générique, lorsque les praticiens et les chercheurs veulent référer à des travaux qui portent sur la qualité de l'interaction homme-produit (Bargas-Avila & Hornbæk, 2011; Hassenzahl, 2008; Hassenzahl, Diefenbach, & Göritz, 2010).

Une définition de l'UX a tout de même été proposée par la norme ISO 9241-210. Elle la définit comme « [les] perceptions et [les] réactions d'une personne qui résultent de l'utilisation effective et/ ou anticipée d'un produit, système ou service » (International Organization for Standardization [ISO], 2010). Dans la littérature, nous retrouvons deux modèles principaux qui proposent un ensemble de composants à l'expérience utilisateur : le modèle de Mahlke (2008) et le modèle de Hassenzahl (2003, 2008).

Mahlke (2008) a proposé le modèle CUE (pour Composant de l'Expérience Utilisateur ou en anglais *Components of User Experience*) (Figure 6). Dans ce modèle, l'expérience utilisateur est considérée comme une combinaison de perceptions sur les qualités instrumentales de la technologie, de perceptions sur ses qualités non-instrumentales et de réactions émotionnelles (Thüring & Mahlke, 2007). Les qualités instrumentales renvoient à l'utilité, à l'utilisabilité, à l'efficacité, au contrôle, à la facilité d'apprentissage, etc. Les qualités non-instrumentales comprennent des aspects esthétiques, symboliques ou motivationnels. Enfin, les réactions émotionnelles renvoient à des sentiments subjectifs, à des réactions physiologiques, à des jugements cognitifs, etc. Ces différentes composantes de l'expérience utilisateur sont également dépendantes des propriétés du système, des caractéristiques de l'utilisateur et des paramètres du contexte. Elles peuvent également entraîner différentes conséquences : un jugement sur le système, l'utilisation de ce système et un choix pour ce système plutôt qu'un autre.

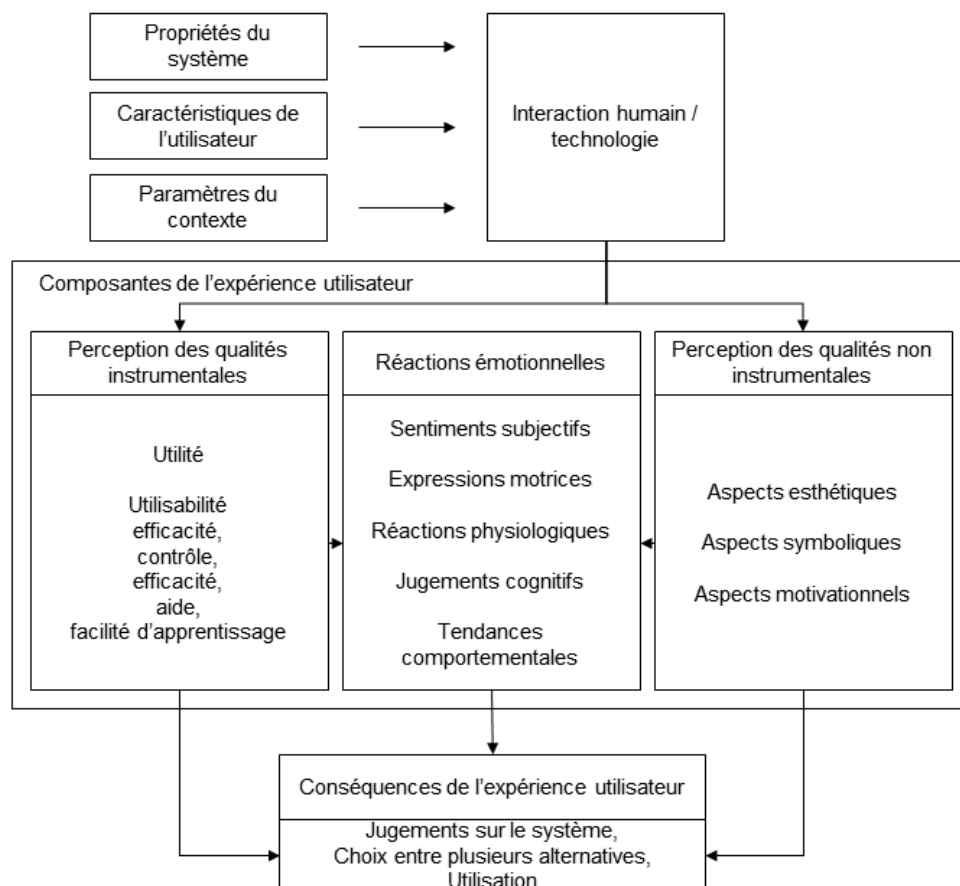


Figure 6. Le modèle des composantes de l'expérience utilisateur (CUE)
(adapté de Mahlke, 2008)

Hassenzahl (2003) a également proposé un modèle de l'expérience utilisateur (Figure 7). Il postule que la manière dont une personne perçoit un produit avec lequel elle interagit repose sur deux dimensions. La première de ces dimensions, la *qualité pragmatique*, renvoie à la réalisation de buts orientés vers la tâche (*do-goals*). Cette dimension renvoie à des qualités instrumentales de la technologie telles que son utilité ou son utilisabilité. La seconde dimension de ce modèle, la *qualité hédonique*, renvoie à des buts orientés vers soi (*be-goals*). Hassenzahl en identifie trois principaux :

- la *stimulation*, c'est-à-dire le besoin de nouveauté et de challenge ;
- l'*identification*, c'est-à-dire le besoin de s'exprimer à travers ce que l'on possède ;
- l'*évoation*, qui renvoie au fait que les technologies génèrent ou provoquent des souvenirs.

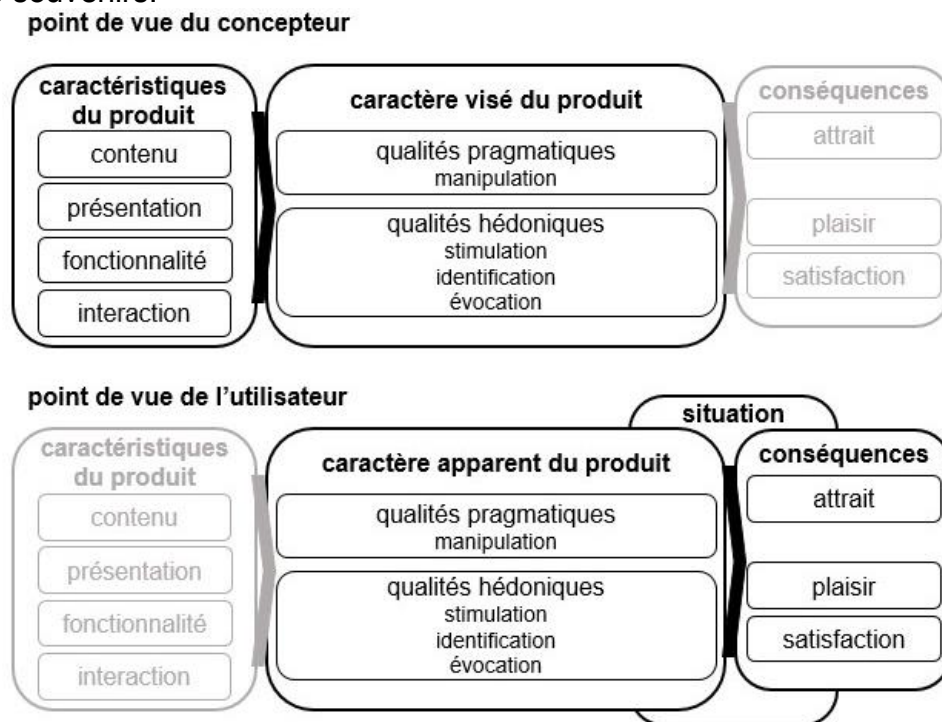


Figure 7. Éléments centraux de l'expérience utilisateur du point de vue de concepteur et de l'utilisateur (adapté de Hassenzahl, 2003)

Pour Hassenzahl (2008), la qualité pragmatique ne rend que plus probable et plus facile la satisfaction de ces trois besoins, mais ce sont eux qui sont à l'origine d'une expérience positive avec la technologie.

Ce modèle diffère selon le point de vue adopté, celui du concepteur du produit ou de son utilisateur (Hassenzahl, 2003). Le concepteur choisit et combine différentes caractéristiques du produit (par exemple, son contenu, son style d'interaction, ses fonctionnalités, etc.) dans le but de donner un « caractère » particulier au produit (par exemple, nouveau, intéressant, prédictible, etc.). Rien ne garantit au concepteur que le caractère qu'il vise sera perçu par l'utilisateur. En effet, selon les caractéristiques du produit, l'utilisateur construit une représentation personnelle de la technologie, qui peut être différente de celle visée par le concepteur. Par exemple, un logiciel aux

interfaces claires pour le concepteur peut être perçu comme complexe et décourageant pour l'utilisateur. Le caractère apparent du produit peut également évoluer au cours du temps. Pour reprendre l'exemple proposé auparavant, le logiciel initialement perçu comme compliqué et décourageant peut finir par être perçu comme un produit utile et pratique.

La façon dont l'utilisateur perçoit le produit entraîne trois types de conséquences : un jugement sur le degré d'attrait du produit, des conséquences émotionnelles et des conséquences comportementales. Tout comme le modèle présenté précédemment, ce modèle postule que la façon dont l'utilisateur perçoit la technologie contribue à son attrait envers la technologie, à du plaisir et de la satisfaction lors de l'utilisation, mais également à des conséquences comportementales comme la décision d'utiliser à nouveau la technologie. À noter que ces conséquences peuvent être très variables ; elles dépendent du contexte d'utilisation du produit. Le logiciel de notre précédent exemple peut ainsi être facilement abandonné dans un contexte privé et être utilisé avec satisfaction dans un contexte professionnel.

Les travaux sur l'expérience utilisateur traitent de la question de l'acceptabilité des technologies d'un point de vue opératoire. En effet, ils postulent qu'une expérience positive avec la technologie conduit à son utilisation future. D'autres travaux ont concerné des dimensions non-instrumentales plus restreintes. Nous évoquerons ici quelques travaux sur les émotions, le plaisir, l'amusement, le flow et la beauté.

Sur la prise en compte des émotions, les travaux de Norman (2004) sur les émotions et le design émotionnel sont parmi les plus connus. L'auteur considère que dans la conception d'un produit, les aspects émotionnels pourraient l'emporter sur les aspects pratiques. De plus, les composantes affectives (donneuses de valeur) et cognitives (donneuses de sens) s'influenceraient mutuellement. Il propose un modèle en trois niveaux :

- le niveau viscéral, qui concerne l'apparence du produit ;
- le niveau comportemental, qui renvoie au plaisir et à l'efficacité dans l'utilisation ;
- le niveau réflexif, qui réfère à la rationalisation et à l'intellectualisation d'un produit. Il s'agit par exemple de l'image de soi renvoyée par l'objet, des souvenirs qu'il rappelle, de la satisfaction qui accompagne sa possession ou son utilisation.

L'intérêt de prendre en compte le plaisir dans les interactions homme-machine a notamment été abordé par Jordan (2000). Pour lui, les utilisateurs s'attendent à ce que les produits soient faciles à utiliser. L'utilisabilité n'est donc pas une qualité satisfaisante en soi qui motive les utilisateurs à utiliser une technologie ; elle est uniquement à l'origine d'insatisfaction quand une technologie est difficile à utiliser. Jordan propose donc une approche centrée sur le plaisir, qu'il définit comme les conséquences émotionnelles, hédoniques et pratiques associées à un produit. Les conséquences émotionnelles sont celles qui affectent l'humeur d'une personne ; les conséquences hédoniques sont associées aux plaisirs sensoriels et esthétiques associés à l'utilisation du produit, et les conséquences pratiques accroissent les bénéfices et renvoient aux conséquences positives de l'utilisation du produit pour la tâche.

Dans le même ordre d'idée, le plaisir et l'amusement sont des dimensions qui intéressent les chercheurs (Blythe & Monk, 2018). Shneiderman (2004) propose différents principes pour concevoir des interfaces amusantes (*fun*). Une interface doit : comporter des fonctions pour que les utilisateurs puissent accomplir leurs tâches, avoir une bonne utilisabilité et une bonne fiabilité pour prévenir la frustration qui pourrait entraver l'amusement et, enfin, engager les utilisateurs grâce à des fonctionnalités amusantes (des métaphores, des contenus, des sons, des graphiques attrayants...).

Le plaisir et l'amusement dans l'interaction avec les technologies sont fréquemment reliés à un état de conscience particulier que l'on appelle le *flow* (Csikszentmihalyi, 1990). Il est défini comme un état d'absorption totale dans une activité. Cet état survient lorsqu'il existe un équilibre idéal entre le niveau de challenge perçu d'une tâche et les compétences d'une personne. Le *flow* est considéré comme une conséquence des expériences plaisantes et comme une motivation à s'engager dans ce type d'activités (Webster, Trevino, & Ryan, 1993).

Pour finir, certaines études se sont intéressées à l'esthétique des technologies (Tractinsky, 2004). Ces travaux la définissent comme « une apparence plaisante ou esthétiquement belle » (p. 771, notre traduction). Bien que l'esthétique ne soit pas considérée comme la qualité la plus importante dans l'interaction avec les technologies, elle peut permettre de départager les produits, notamment si toutes présentent les fonctionnalités requises pour les utilisateurs à des prix peu élevés. Ces études considèrent donc que la beauté d'une technologie peut avoir un effet, conjointement à d'autres qualités, sur son acceptabilité.

1.3. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptabilité pratique

Les méthodes utilisées pour évaluer l'acceptabilité pratique ne sont pas spécifiques, puisque l'approche consiste à évaluer l'acceptabilité de la technologie à travers différentes dimensions. Les méthodes que nous présentons plus tôt dans cet état de l'art pour évaluer l'utilité et l'utilisabilité (enquêtes d'usage, tests utilisateurs, inspection d'interfaces) peuvent alors être employées pour évaluer l'acceptabilité pratique d'une technologie. Évidemment, de nombreux questionnaires existent, tels que le *System Usability Scale* (SUS) (Brooke, 1996), l'*Usability Metric for User Experience* (UMUX) (Finstad, 2010) ou encore le *Computer Usability Satisfaction Questionnaire* (CSUQ) (Lewis, 1995) pour évaluer l'utilisabilité.

Pour l'évaluation des dimensions non-instrumentales, nous évoquons différentes dimensions évaluées dans la partie précédente. Ces évaluations consistent généralement en des questionnaires, par exemple sur le plaisir perçu (Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1992) ou encore sur le *flow* (Trevino & Webster, 1992). Certains questionnaires larges portent également sur l'expérience utilisateur dans son ensemble, en intégrant à la fois des dimensions instrumentales et des dimensions non-instrumentales (e.g., le questionnaire AttrakDiff2, de Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003). D'autres méthodes existent également pour évaluer l'expérience utilisateur. Lallemand et Gronier (2018) ont d'ailleurs proposé un recueil très complet de ces méthodes. Pour illustrer le type de méthodes décrites, nous prendrons l'exemple des complétions de phrases. Il s'agit d'une méthode qualitative dont le principe est de proposer aux utilisateurs des débuts de phrases à compléter spontanément. Elles permettent d'interroger différentes dimensions, en autres

l'expérience globale avec la technologie (par exemple, « *Quand j'utilise ce système je me sens...* »), son utilité (par exemple, « *Je trouve ce système utile pour...* »), son utilisabilité (par exemple, « *Le système est facile à utiliser, car...* ») ou encore son esthétique (par exemple, « *Le design de ce système est...* »).

L'évaluation de l'acceptabilité pratique repose alors sur différentes méthodes, qui visent habituellement à évaluer des dimensions annexes à l'acceptabilité. Les résultats obtenus permettent d'adapter la technologie aux caractéristiques de l'utilisateur, du contexte et de la tâche, afin de favoriser son adoption.

1.4. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptabilité pratique

L'apport majeur de l'acceptabilité pratique est d'offrir des méthodes d'évaluation et des solutions concrètes pour rendre acceptables des technologies à différents types d'utilisateurs dans des contextes d'usage variés. Malgré ces apports, différentes limites sont à pointer. Comme nous l'expliquions précédemment, les études qui s'inscrivent dans cette approche accordent une grande importance à l'utilisabilité des technologies, et donc à la dimension cognitive de l'interaction homme-technologie (Brangier et al., 2010), parfois au détriment de dimensions hédoniques et sociales. Pourtant, l'utilisabilité ne peut pas expliquer à elle seule l'utilisation d'une technologie (Bobillier Chaumon, 2016).

La seconde limite de l'acceptabilité pratique est d'ordre méthodologique et épistémologique. En effet, les études de cette approche sont principalement conduites dans des conditions expérimentales, en omettant les influences sociales qui imprègnent l'interaction homme-technologie, ainsi que la valeur et le sens que l'individu donne à la technologie (Brangier et al., 2010). Pour ces raisons, l'approche adoptée est restrictive et peu compréhensive de l'interaction dans sa globalité. D'abord, l'interaction s'inscrit dans un contexte social, avec ses autres acteurs, ses règles, ses influences, ses enjeux... Ensuite, l'utilisateur n'est pas passif face à la technologie, il n'interagit pas seulement avec elle, mais il l'intègre à ses activités, il l'adapte et il lui donne sens.

Par ailleurs, en plus du contexte social, il est important de prendre en compte le rapport subjectif de l'utilisateur avec la technologie, la façon dont il la perçoit. Alors que l'acceptabilité pratique envisage l'acceptabilité sous l'angle de l'interaction homme-technologie (en laboratoire principalement), l'acceptabilité sociale propose d'étudier les perceptions des utilisateurs sur les qualités de la technologie, parfois même avant les premières utilisations. C'est cette approche que nous allons présenter dans la partie suivante.

2. L'ACCEPTABILITÉ SOCIALE : PRÉDIRE L'USAGE DE LA TECHNOLOGIE

Les modèles proposés par l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale se centrent sur les attitudes et les perceptions des utilisateurs vis-à-vis d'une technologie. Ils font partie des modèles d'acceptabilité les plus développés et les plus connus.

L'approche centrée sur l'acceptabilité sociale a été historiquement développée par la théorie de la diffusion des innovations de Rogers (1962, 1995) (Dubois, Bobillier Chaumon, & Ngom, 2015). Cette théorie cherche à expliquer la diffusion des innovations dans la population, et cela en s'appuyant sur les perceptions des

utilisateurs. Les innovations sont considérées ici au sens large, on peut donc y inclure les technologies. Pour qu'une innovation soit diffusée, cette théorie considère que les individus doivent juger qu'elle possède certains attributs. Elle doit ainsi :

- présenter des avantages relatifs, c'est-à-dire représenter « un plus » pour l'utilisateur (par rapport à ce qu'il possède/utilise déjà) ;
- être compatible avec ses valeurs, ses besoins et ses expériences antérieures ;
- être facile d'utilisation ;
- être facile à expérimenter, c'est-à-dire facilement accessible ;
- donner des résultats observables, c'est-à-dire que les avantages qu'elle présente doivent être rapidement visibles.

Cette théorie est assez répandue dans la littérature sur l'acceptabilité des technologies puisqu'elle permet d'identifier certaines perceptions pouvant conduire les individus à adopter une technologie. Elle propose également une taxonomie des utilisateurs selon leur rapidité à adopter les innovations (les innovateurs, les premiers adeptes, la majorité précoce, la majorité tardive et les retardataires). Toutefois, c'est une théorie globale qui vise à expliquer la diffusion des innovations dans des contextes sociétaux larges, sans prendre en compte les processus psychologiques d'acceptation des technologies. D'autres modèles se sont intéressés à ces processus psychologiques. Il s'agit des modèles basés sur la satisfaction de l'utilisateur et des modèles basés sur les intentions d'utiliser les technologies.

2.1. L'acceptabilité en termes de satisfaction de l'utilisateur

2.1.1. Modèle du succès d'une technologie (DeLone & McLean, 1992, 2003)

Certains modèles d'acceptabilité des technologies postulent que la satisfaction de l'utilisateur est un gage de succès. Parmi ces modèles, on peut notamment citer le modèle du succès d'une technologie (*IS Success Model*) de DeLone & McLean (1992) (Figure 8). Dans ce modèle la satisfaction de l'utilisateur est centrale. Elle dépend de l'utilisation de la technologie, et surtout de deux caractéristiques de cette dernière : la *qualité du système* et la *qualité de l'information*. Les auteurs décrivent la qualité du système par sa facilité d'utilisation, sa convivialité ou encore son accessibilité. La qualité de l'information renvoie aux informations fournies par le système. Leur qualité est évaluée en termes d'exactitude, de clarté ou encore de pertinence. L'utilisation d'un système et la satisfaction de l'utilisateur entraînent par la suite des *conséquences individuelles* (par exemple, une meilleure compréhension des informations, une diminution du temps pour prendre une décision) qui ont à leur tour des effets

organisationnels (par exemple, une augmentation de la productivité, une augmentation des ventes ou du profit).

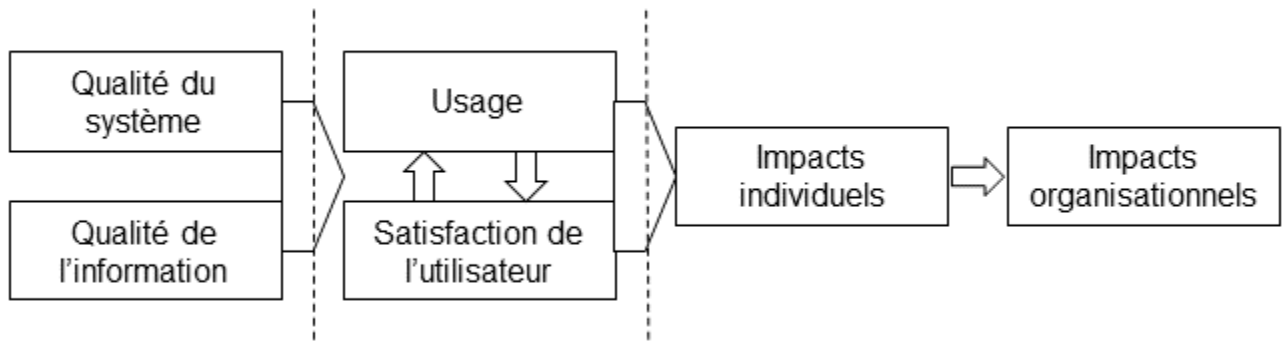


Figure 8. Modèle du succès des technologies de DeLone & McLean (1992)

Une deuxième version de ce modèle a été proposée dix ans plus tard (DeLone & McLean, 2003) (Figure 9). Les auteurs ont procédé à trois modifications majeures.

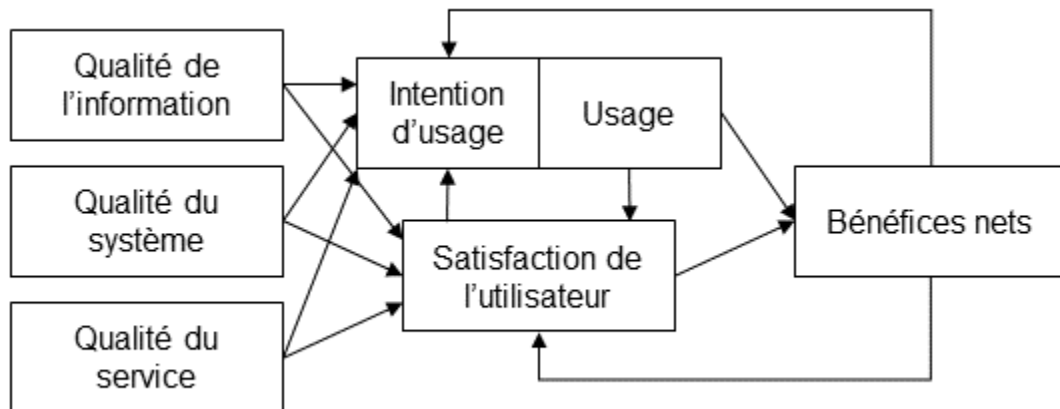


Figure 9. Modèle du succès des technologies révisé (DeLone & McLean, 2003)

Premièrement, ils ont ajouté une troisième qualité à la technologie : il s'agit de la *qualité du service*. Elle désigne de manière générale la prestation fournie par le système pour l'utilisateur. Les auteurs expliquent l'importance de cette variable par le fait que les utilisateurs sont aujourd'hui des clients, et qu'une mauvaise prestation (ou une mauvaise assistance de l'utilisateur) peut avoir des conséquences négatives sur sa satisfaction et, à terme, sur le nombre de clients ou sur le nombre de ventes. La deuxième modification majeure de ce modèle concerne l'introduction des intentions d'usage⁷ alors que le premier modèle traitait de l'usage effectif. Ce choix est expliqué par la difficulté à appréhender quantitativement (par la fréquence d'utilisation, par la durée d'utilisation, etc.) et qualitativement (par l'intensité de l'utilisation, par son

⁷ Nous verrons dans la suite de ce chapitre que les modèles d'acceptabilité des technologies s'appuient aujourd'hui majoritairement sur les intentions d'usage plutôt que sur l'usage effectif des technologies – ce choix épistémologique sera discuté au sujet des limites de l'acceptabilité sociale.

efficacité, par l'appropriation, etc.) cette variable. La dernière modification apportée au modèle concerne les conséquences de la satisfaction. Alors que dans le premier modèle elles étaient divisées en conséquences individuelles et en conséquences organisationnelles, elles forment dans ce second modèle les bénéfices nets. Ce choix permet d'élargir les conséquences de la satisfaction de l'utilisateur.

2.1.2. Théorie de la disconfirmation des attentes en marketing (Oliver, 1980, 1981)

Les modèles basés sur la satisfaction des utilisateurs intègrent également les modèles qui s'intéressent aux attentes des utilisateurs. Ainsi, Oliver (1980, 1981) a développé la théorie de la disconfirmation des attentes (*expectation-confirmation theory*). C'est un modèle issu du marketing et qui vise à comprendre ce qui motive une personne à continuer à utiliser ou à acheter un produit. Oliver avance l'idée qu'avant l'achat d'un produit, l'individu forme des attentes. La satisfaction (ou l'insatisfaction) de ses attentes détermine les attitudes à l'égard du produit et par la suite ses intentions de l'utiliser ou de l'acheter à nouveau. Il existe trois niveaux d'écart entre les attentes de l'individu et son expérience du produit. D'abord, il peut n'y avoir aucun écart : l'individu est alors satisfait, car ses attentes ont été confirmées. Par exemple, il a bien trouvé en rayon le produit qu'il recherchait. Ensuite, il peut exister une disconfirmation positive des attentes de l'utilisateur : il n'a pas trouvé le produit qu'il recherchait en rayon, mais il a bénéficié d'une forte promotion non attendue sur un autre produit. Enfin, il peut survenir une disconfirmation négative, dans le cas où les attentes de l'utilisateur ne sont pas confirmées et qu'il a, en plus, fait face à des événements négatifs. Par exemple, il n'a pas trouvé le produit recherché en rayon et il attendu vingt minutes à la caisse du magasin.

2.1.3. Théorie de la disconfirmation des attentes, adaptée aux technologies (Bhattacharjee, 2001)

La théorie de la disconfirmation des attentes a par la suite été adaptée pour traiter spécifiquement de l'intention de continuer à utiliser une technologie. Bhattacharjee (2001) propose ainsi un modèle autour de la satisfaction d'un individu suite à son utilisation d'une technologie (Figure 10).

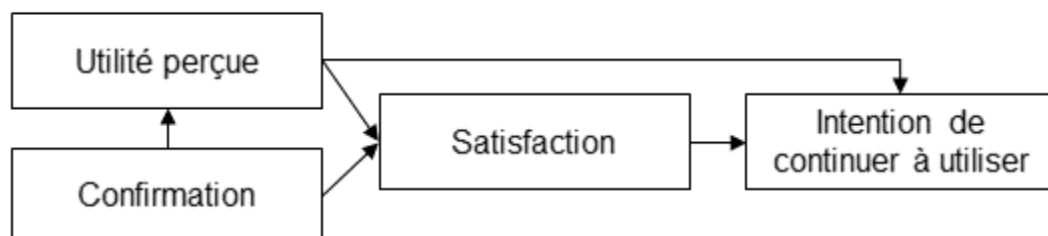


Figure 10. Théorie de la disconfirmation des attentes, adaptée aux technologies (Bhattacharjee, 2001)

Comme pour le modèle initial, il postule que l'utilisateur forme des attentes sur une technologie, ainsi que sur sa performance avec cette technologie *a priori* de son utilisation. La confirmation ou la disconfirmation de ces deux attentes déterminent à la fois la perception de l'utilisateur sur l'utilité de la technologie ainsi que sa satisfaction

vis-à-vis de l'utilisation. Ces deux variables à leur tour déterminent l'intention d'utiliser à nouveau la technologie.

Des limites ont été pointées concernant ces théories basées sur la satisfaction de l'utilisateur. Premièrement, nous avons peu d'informations sur les structures causales des modèles du succès des technologies de DeLone et McLean (1992, 2003). Ainsi, il n'est pas précisé laquelle des variables est la plus explicative de la satisfaction des utilisateurs ou leurs intentions d'utiliser la technologie (Dubois et al., 2015). Par ailleurs, les modèles qui se centrent sur les attentes des utilisateurs posent la question de la possibilité pour eux de se former des attentes claires et précises, qu'ils pourraient confronter à leur expérience réelle.

2.2. Les modèles d'acceptabilité basés sur les perceptions de la technologie par les individus

2.2.1. *Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 1989)*

Une autre approche propose d'intégrer les cognitions sociales dans l'acceptabilité des technologies. Le modèle d'acceptabilité des technologies (ou TAM pour *Technology Acceptance Model*) de Davis (1989) s'inscrit dans cette approche. Il est actuellement le modèle d'acceptabilité des technologies le plus utilisé ; en 2011, Hsiao et Yang comptaient plus de deux mille citations de l'article original.

Il repose sur deux théories psychosociales visant à expliquer l'intention comportementale, c'est-à-dire la motivation d'un individu à adopter un comportement. Ces deux théories sont la Théorie de l'Action Raisonnée (TAR ; Fishbein & Ajzen, 1975) et la Théorie du Comportement Planifié (TCP ; Ajzen, 1991). La Théorie de l'Action Raisonnée (Fishbein & Ajzen, 1975) explique que le comportement d'un individu est déterminé par ses intentions d'adopter ce comportement (Figure 11). Cette intention est elle-même déterminée par ses attitudes (à l'égard de ce comportement) et par la norme subjective (c'est-à-dire le degré avec lequel il pense que les personnes qui sont importantes pour lui pensent qu'il devrait ou qu'il ne devrait pas adopter un comportement donné).

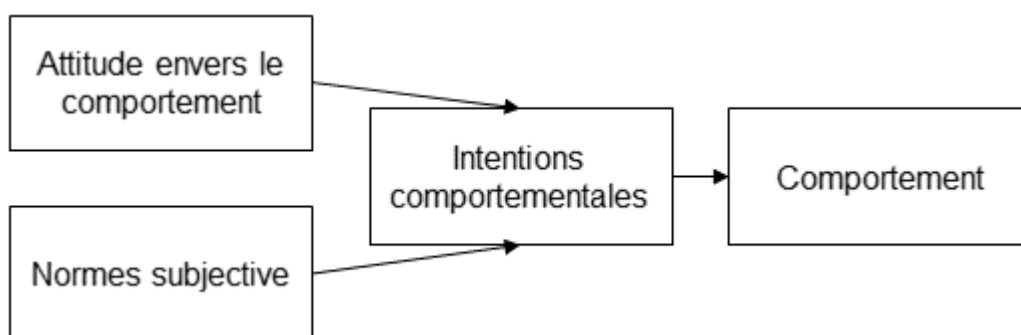


Figure 11. Théorie de l'Action Raisonnée (Fishbein & Ajzen, 1975)

La Théorie du Comportement Planifié (Ajzen, 1991a) reprend la Théorie de l'Action Raisonnée en y ajoutant le contrôle comportemental perçu (Figure 12). Ce dernier renvoie aux perceptions des individus sur leurs compétences, leurs ressources et leurs opportunités. Ce sont ces perceptions qui déterminent si l'individu pense avoir suffisamment de contrôle pour adopter un comportement donné. Ainsi, dans ce modèle les intentions comportementales sont déterminées par les attitudes, la norme subjective et le contrôle comportemental perçu.

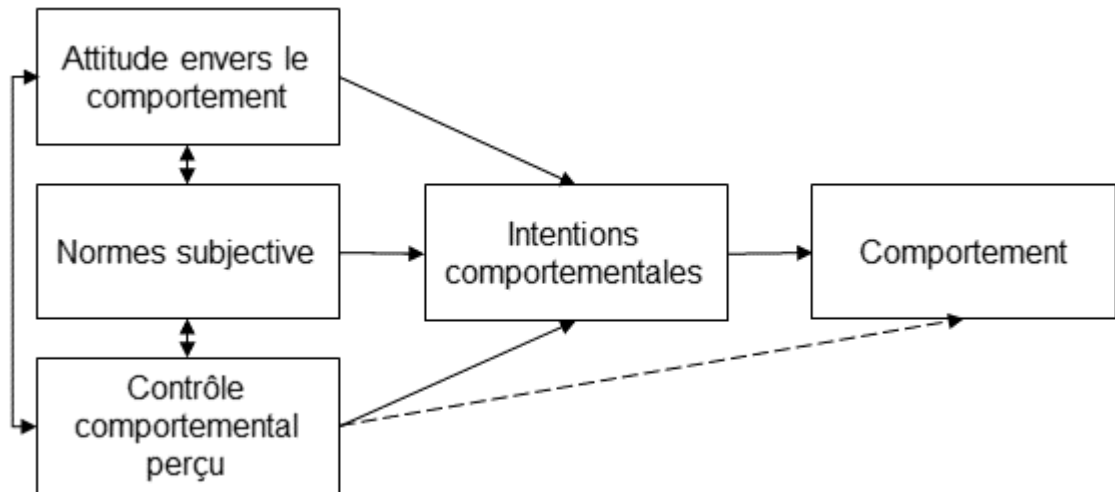


Figure 12. Théorie du Comportement Planifié (Ajzen, 1991)

C'est en appliquant ces deux théories psychosociales à l'intention d'utiliser une technologie que Davis propose une première version du modèle de l'acceptabilité des technologies (*Technology Acceptance Model, TAM*) en 1986 dans son travail de thèse. Cette version du modèle postule que l'intention d'utiliser une technologie est dépendante des attitudes des utilisateurs, c'est-à-dire de leur jugement (positif ou négatif) envers l'usage. Ainsi, ce modèle explique que si l'utilisateur a une attitude positive envers l'utilisation d'une technologie, il aura l'intention de l'utiliser. L'originalité de ce modèle réside dans la proposition de deux variables prédictives des attitudes. Ces variables sont relatives aux perceptions des utilisateurs sur deux propriétés de la technologie : son utilité perçue et sa facilité d'utilisation perçue. L'utilité perçue est définie comme « le degré avec lequel un individu croit que l'utilisation d'un système améliorera sa performance au travail » (Davis, 1989, p. 320, traduit par Bobillier Chaumon, Dubois, & Retour, 2006, p. 249). La facilité d'utilisation perçue renvoie au « degré avec lequel un individu croit que l'utilisation d'un système se fera sans difficultés ni efforts supplémentaires » (Davis, 1989, p. 320, traduit par Bobillier Chaumon, Dubois, & Retour, 2006, p. 249).

Par la suite, Davis a supprimé les attitudes dans son modèle (Davis, 1989; Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1989), après qu'il ait été montré que l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue avaient des effets directs sur les intentions d'usage. Le TAM explique donc les intentions d'utiliser une technologie par les perceptions des utilisateurs sur son utilité et sa facilité d'utilisation (Figure 13).

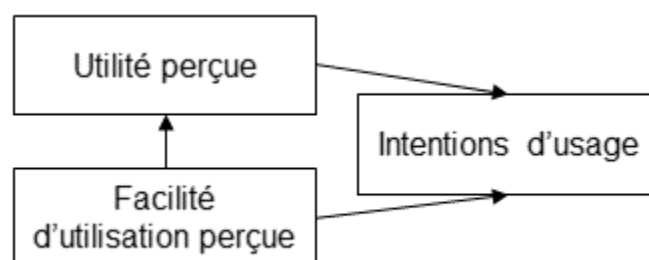


Figure 13. Modèle de l'acceptabilité des technologies (TAM, *Technology Acceptance Model*) (Davis, 1989)

La popularité du TAM peut être expliquée par sa parcimonie. En effet, il est aisé d'étendre ce modèle pour l'adapter à différentes technologies (e.g., Amoako-Gyampah, 2007; Choi & Ji, 2015), à différents contextes (e.g., Brown, Massey, Montoya-Weiss, & Burkman, 2002; Y.-C. Huang, Backman, Backman, & Moore, 2013) ou à différents utilisateurs (e.g., Elias, Smith, & Barney, 2012; Venkatesh & Morris, 2000). Les extensions du TAM visent à accroître son pouvoir prédictif. Ces extensions (voir Marangunić & Granić, 2015, pour une revue) comprennent des facteurs issus d'autres modèles (e.g., la norme subjective, le contrôle comportemental perçu), des facteurs relatifs aux croyances des individus (e.g., possibilité d'essayer la technologie, richesse du contenu) et des variables externes (e.g., des caractéristiques démographiques, le sentiment d'efficacité personnel).

Le développement de ce modèle a ouvert la voie au développement d'autres modèles d'acceptabilité des technologies qui reposent sur le même principe, c'est-à-dire qu'ils visent tous à expliquer les intentions d'usage d'une technologie par le biais de différentes variables, majoritairement relatives aux perceptions des utilisateurs. Nous allons maintenant présenter ces différents modèles ainsi que les extensions ou les changements qu'ils proposent.

2.2.2. Technology Acceptance Model 2 (TAM2) (Venkatesh & Davis, 2000)

Aujourd'hui, deux autres versions du TAM ont été proposées. La première, le TAM2 (Venkatesh & Davis, 2000) est une extension du TAM, à laquelle sont ajoutés des antécédents de l'utilité perçue (*Figure 14*). Ce modèle vise à prédire les intentions d'usage de technologies dans des contextes professionnels. Les antécédents de l'utilité perçue sont d'ordre psychosocial – la norme subjective et l'image – et d'ordre cognitif – la pertinence avec le travail, la qualité des résultats et leur visibilité. La *norme subjective* renvoie à la norme véhiculée par des personnes proches de l'individu, tout comme dans les modèles psychosociaux des intentions comportementales présentés auparavant. Pour l'image, les auteurs reprennent la définition donnée par Moore et Benbasat (1991). Elle renvoie « au degré avec lequel l'individu croit que la technologie améliore son statut dans un système social donné » (Venkatesh & Davis, 2000, p. 189, notre traduction). La *pertinence avec le travail* renvoie au degré avec lequel l'individu pense que l'utilisation du système est pertinente dans son travail. La qualité des résultats renvoie au degré de qualité avec lequel le système réalise les tâches. La visibilité des résultats est également reprise de Moore et Benbasat (1991) ; elle renvoie à la tangibilité des résultats obtenus avec le système. Enfin, le TAM2 intègre deux modérateurs : le volontariat et l'expérience. Le volontariat renvoie au degré avec lequel les individus perçoivent leur décision d'adopter une technologie comme étant

non imposée. Quant à l'expérience, il s'agit de l'expérience de l'utilisateur avec la technologie.

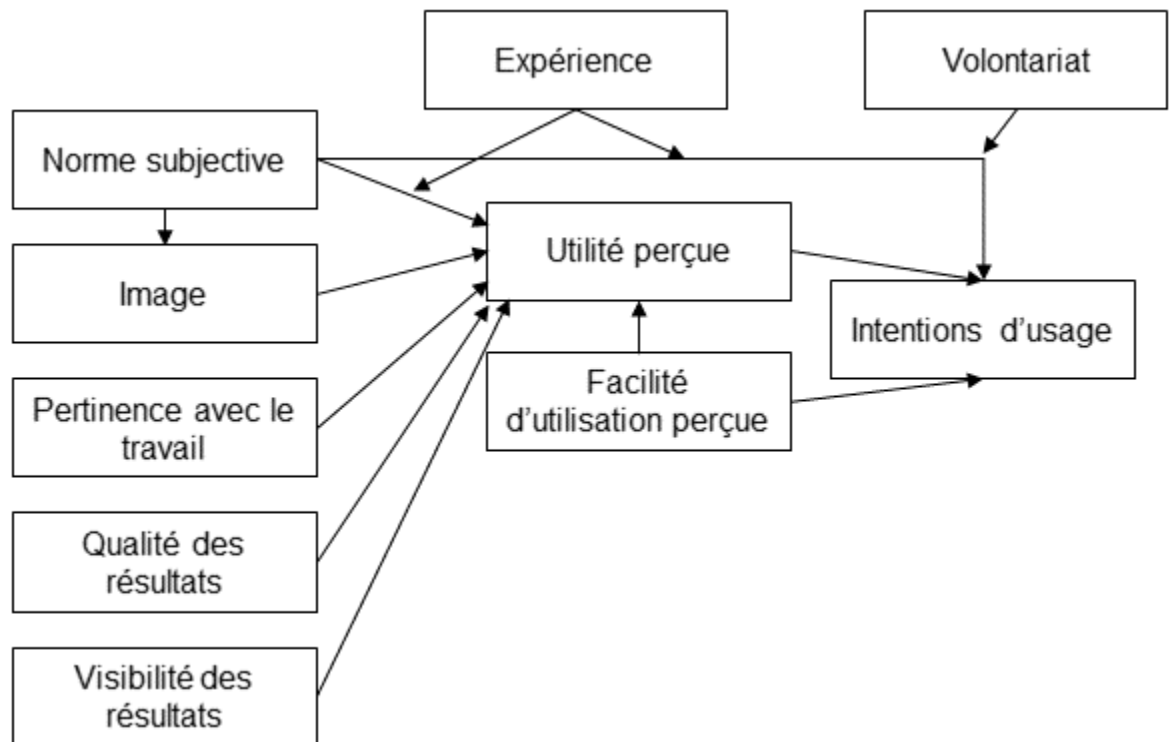


Figure 14. Modèle de l'acceptabilité des technologies 2 (TAM2) (Venkatesh & Davis, 2000)

Les auteurs ont testé le TAM2 dans quatre organisations et à trois points de mesure : avant l'implantation de la technologie, un mois après l'implantation et trois mois après l'implantation. Dans deux de ces sites, l'utilisation du système était volontaire alors qu'elle était imposée dans les deux autres. Le TAM explique environ 60% de la variance dans les intentions d'usage. Les résultats confirment à nouveau l'influence de l'utilité perçue et de la facilité d'utilisation perçue sur les intentions d'usage. Les résultats permettent d'identifier empiriquement les déterminants de l'utilité perçue. Il s'agit de la norme subjective, de l'image, de la pertinence avec le travail et de la visibilité des résultats. La qualité des résultats a un effet modérateur sur la relation pertinence avec le travail – utilité perçue. Par ailleurs, dans les contextes où l'usage est imposé par l'organisation, la norme sociale a également un effet direct sur les intentions d'usage. Un autre résultat intéressant concerne l'effet de l'expérience ; plus les utilisateurs gagnent de l'expérience avec la technologie, moins ils s'appuient sur des variables sociales (norme subjective) pour juger de l'utilité perçue du système et pour décider d'une utilisation future. Toutefois, ils continuent à juger l'utilité d'un système selon les potentiels bénéfiques qu'il peut avoir sur leur statut (image). En revanche, l'effet des variables d'ordre cognitif perdure avec l'expérience.

2.2.3. Technology Acceptance Model (TAM3) (Venkatesh & Bala, 2008)

Le TAM3 (Venkatesh & Bala, 2008) reprend le TAM2. Il étend ce modèle en ajoutant des déterminants à la facilité d'utilisation perçue (Figure 15). Il cherche également à

étudier les influences réciproques entre les déterminants de l'utilité perçue et les déterminants de la facilité d'utilisation perçue.

Deux types d'antécédents à la facilité d'utilisation perçue sont ajoutés dans ce modèle : des variables d'ancrage et des variables d'ajustement. Les variables d'ancrage orientent la perception des utilisateurs sur la facilité d'utilisation de la technologie. Les variables d'ajustement interviennent avec l'expérience des utilisateurs de la technologie, elles les amènent à faire évoluer leurs perceptions au fil des utilisations.

Les variables d'ancrage sont au nombre de quatre : le sentiment d'auto-efficacité face à l'informatique, la perception du contrôle externe, l'anxiété face à l'informatique et le caractère ludique de l'interaction. L'*auto-efficacité face à l'informatique* renvoie au degré avec lequel un individu pense qu'il a les capacités de réaliser une tâche en utilisant un système informatique. La *perception de contrôle externe* désigne les conditions facilitatrices à l'utilisation de la technologie, elle renvoie au degré avec lequel l'individu pense qu'il existe des ressources techniques et organisationnelles qui soutiennent l'utilisation du système. L'*anxiété face à l'informatique* correspond à « l'appréhension de l'individu, voire à sa peur, quand il est confronté à l'idée d'utiliser un ordinateur » (Venkatesh, 2000, p. 349, notre traduction). Le *caractère ludique de l'interaction* renvoie à la spontanéité dans l'interaction avec les ordinateurs.

Deux variables d'ajustement sont étudiées : le plaisir perçu et l'utilisabilité objective. Le *plaisir perçu* renvoie au degré avec lequel « l'utilisation d'un système est plaisante en elle-même quelle que soient les conséquences de son utilisation » (Venkatesh, 2000, p. 351, notre traduction). L'*utilisabilité objective* renvoie à la comparaison des systèmes selon les efforts effectifs qu'ils exigent pour exécuter certaines tâches (plutôt que sur la perception de ces efforts).

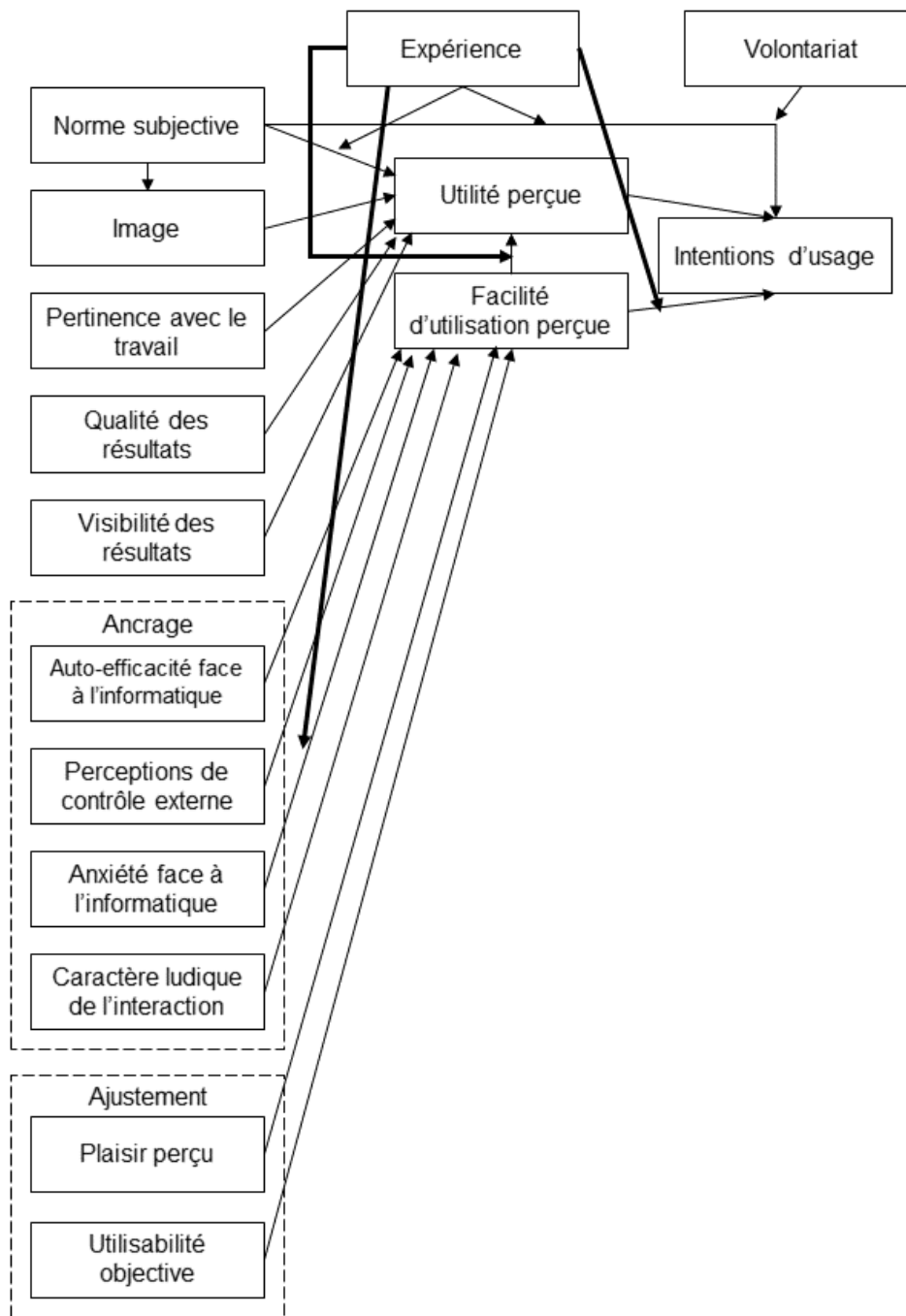


Figure 15. Modèle d'acceptabilité des technologies 3 (TAM3)
(Venkatesh & Bala, 2008)

Note. Les traits épais indiquent de nouvelles modérations proposées par le TAM3.

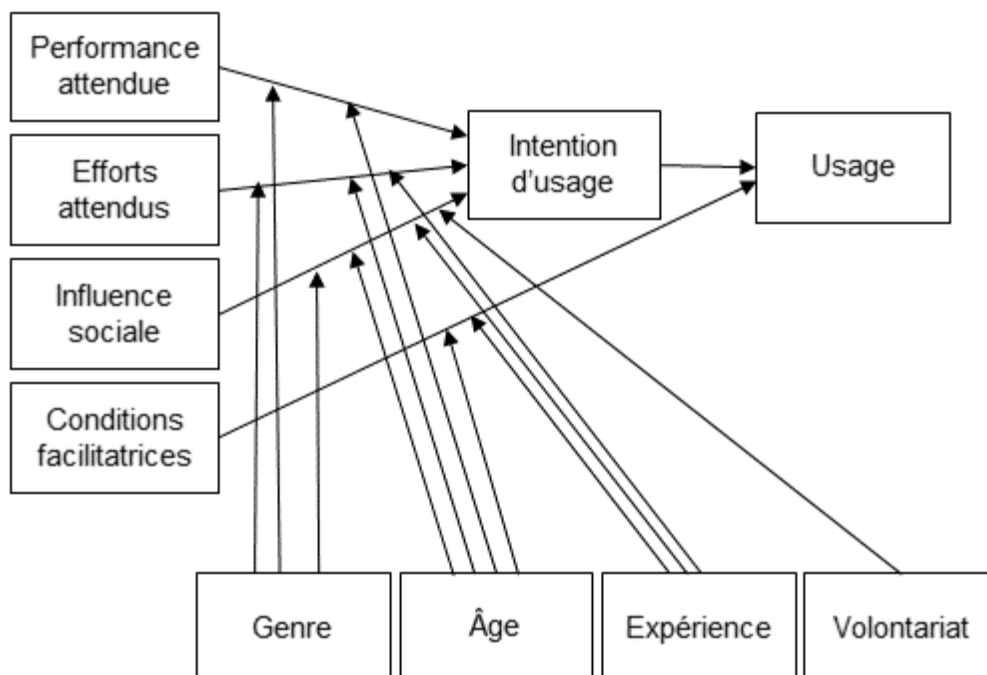
Le TAM3 apporte deux contributions théoriques importantes. Premièrement, les résultats ne montrent pas d'influence des déterminants de la facilité d'utilisation perçue sur les déterminants de l'utilité perçue. Ils suggèrent donc que la formation de ces jugements repose sur des variables différentes. Deuxièmement – c'est ici le résultat le plus intéressant – l'étude longitudinale conduite par Venkatesh & Bala (2008) suggère que l'influence de la facilité d'utilisation perçue sur les intentions d'usage diminue avec l'expérience avec la technologie, alors que son effet sur l'utilité perçue croît. Ce résultat suggère qu'il est nécessaire que les utilisateurs jugent la

technologie facile à utiliser lors des premières utilisations pour avoir l'intention de l'utiliser à nouveau. En revanche, en gagnant de l'expérience avec la technologie, ces perceptions sur la facilité d'utilisation perçue de la technologie influencent davantage les perceptions sur son utilité.

2.2.4. Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) (Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003)

Sur la lignée des modèles psychosociaux des intentions comportementales et des modèles d'acceptabilité des technologies présentés précédemment, un autre modèle d'acceptabilité des technologies a été proposé. Il s'agit du modèle unifié de l'acceptabilité et de l'usage des technologies ou de l'UTAUT (*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*, Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003). Ce modèle en combine huit autres — dont le TAM, la TAR, le TCP évoqués précédemment. Il vise à être davantage explicatif des intentions d'usage que les différents modèles qui ont guidé son développement. Il met en jeu quatre variables pour expliquer les intentions d'usage d'une technologie : la *performance attendue*, l'*effort attendu*, l'*influence sociale* et les *conditions* (Figure 16).

La performance attendue s'apparente à l'utilité perçue. Elle désigne « le degré avec lequel un individu pense que l'utilisation du système va l'aider à améliorer sa performance au travail » (Venkatesh et al., 2003, p. 447, notre traduction). L'effort attendu est une variable proche de la facilité d'utilisation perçue. Elle renvoie au « degré de facilité avec lequel un individu croit pouvoir utiliser le système » (Venkatesh et al., 2003, p. 450, notre traduction). L'influence sociale fait référence au « degré avec lequel un individu pense que les personnes importantes pour lui croient qu'il doit ou ne doit pas utiliser le nouveau système » (Venkatesh et al., 2003, p. 451, notre traduction). Enfin, les conditions facilitatrices renvoient à la croyance de l'individu dans le fait que des infrastructures organisationnelles et techniques existent et facilitent l'utilisation du système. Quatre variables modératrices sont également intégrées à ce modèle. Il s'agit du genre, de l'âge, de l'expérience et du volontariat.



*Figure 16. Modèle unifié de l'acceptabilité et de l'usage des technologies (UTAUT)
(Venkatesh et al., 2003)*

Le modèle a été testé dans quatre organisations, avec 215 participants. Il explique environ 70 % de la variance des intentions d'usage. Des mesures ont été réalisées à trois temps : avant l'implantation de la technologie, 1 mois après l'implantation et 3 mois après l'implantation. Les mesures prennent également en compte l'usage effectif 6 mois après l'implantation de la technologie. Les résultats permettent d'identifier trois déterminants principaux aux intentions d'usage : la performance attendue, l'effort attendu et l'influence sociale. Les intentions d'usage et les conditions facilitatrices ont un effet direct sur l'usage effectif. Des effets modérateurs de l'expérience, du volontariat, du genre et de l'âge ont été également mis en évidence. Par exemple, les effets de l'effort attendu et l'influence sociale sur les intentions d'usage sont plus forts pour les femmes et pour les travailleurs plus âgés et ceux qui ont peu d'expérience avec la technologie. L'influence sociale est également plus forte pour les situations où l'utilisation est imposée.

2.2.5. Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT2) (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012)

Une seconde version de l'UTAUT a également été proposée. L'UTAUT2 (Venkatesh, Thong, & Xu, 2012) vise à étudier l'acceptabilité des technologies dans des contextes domestiques. Pour ce faire, les auteurs ont étendu l'UTAUT en intégrant trois

dimensions : la motivation hédonique, le prix de la technologie et une dimension relative aux habitudes des utilisateurs (Figure 17).

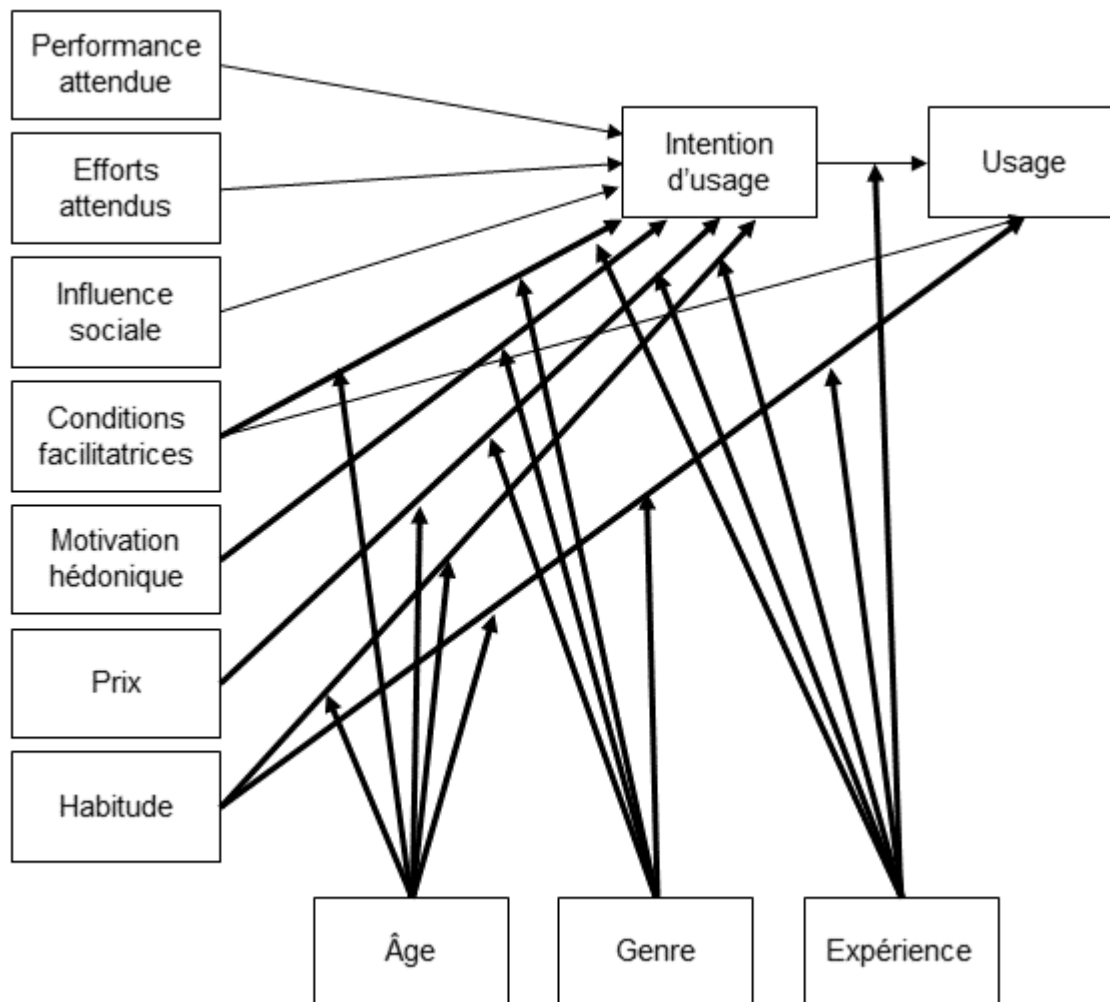


Figure 17. Modèle unifié de l'acceptabilité et de l'usage des technologies (UTAUT2) (Venkatesh et al., 2012)

La motivation hédonique renvoie au plaisir ou à l'amusement qui résulte de l'utilisation de la technologie. Puisque dans un contexte domestique ce sont les utilisateurs qui doivent payer pour utiliser la technologie, les auteurs s'intéressent au prix de celle-ci. Ils s'intéressent plus particulièrement au compromis cognitif pour les utilisateurs entre le coût de la technologie et les avantages qu'ils perçoivent à son utilisation. Les auteurs distinguent l'expérience de l'utilisateur (également comprises dans le modèle) de ses habitudes. Dans ce cadre, les habitudes renvoient au caractère « automatique » de l'utilisation. Pour résumer, l'UTAUT2 postule que les intentions d'utiliser une technologie dans un contexte domestique dépendent de la performance attendue, de l'effort attendu, de l'influence sociale, des conditions facilitatrices, de la motivation hédonique, du prix et des habitudes des utilisateurs. Ces différentes relations seraient modérées par l'âge, le genre et l'expérience.

Ce modèle a été testé avec 1 512 participants au sujet d'internet sur leurs téléphones. Les résultats montrent les que dans un contexte domestique, la motivation hédonique et le prix sont des déterminants majeurs dans l'acceptabilité des

technologies. La motivation hédonique est d'ailleurs le plus fort prédicteur des intentions d'usage, contrairement aux contextes organisationnels où c'est la performance attendue qui prime. Toutefois, il est important de combiner à la fois des caractéristiques hédoniques et des caractéristiques utilitaires, puisque ces deux types de variables ont des effets sur les intentions d'usage, même dans un contexte domestique. Enfin, les auteurs démontrent la supériorité de l'UTAUT2 sur l'UTAUT dans des contextes domestiques : ils avancent que l'UTAUT2 explique 74 % de la variance des intentions d'usage (contre 56 % avec l'UTAUT) et 52 % de la variance des usages effectifs (contre 40 % avec l'UTAUT).

Ce dernier modèle achève la présentation des principaux modèles d'acceptabilité sociale des technologies qui se centrent sur les intentions d'usage. Nous allons maintenant présenter les principales méthodes utilisées dans les études sur l'acceptabilité sociale des technologies.

2.3. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale

L'étude de l'acceptabilité sociale repose principalement sur des échelles de mesure. Les échelles évaluant l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et les intentions d'usage proposées par Davis (1989) et Davis et al. (1989) sont fréquemment utilisées (Yousafzai, Foxall, & Pallister, 2007a). Elles sont parfois combinées à d'autres échelles, en fonction des objectifs des chercheurs (pour une revue des variables utilisées, voir Lee, Kozar, & Larsen, 2003). On relève par exemple des échelles qui évaluent les attitudes (Ajzen, 1991a), le sentiment d'efficacité en informatique (Compeau & Higgins, 1995), le plaisir perçu (Davis et al., 1992) ou encore la technophilie des utilisateurs (Agarwal & Prasad, 1998).

Les données recueillies par questionnaires sont ensuite traitées statistiquement afin de mettre en évidence des liens entre les différentes variables des modèles. L'objectif des auteurs étant d'identifier des variables prédictives des intentions d'usage, ainsi que des déterminants aux perceptions des utilisateurs sur l'utilité ou la facilité d'utilisation de la technologie. Lee, Kozar, et Larsen (2003) relèvent dans une méta-analyse conduite sur les résultats du TAM que les méthodes d'analyse les plus utilisées sont des modélisations par équations structurales (SEM, PLS, LISREL), ainsi que des analyses de régressions. Dans une méta-analyse plus récente conduite sur les résultats de l'UTAUT, Williams, Rana, et Dwivedi (2011) répertorient le même type de méthodes.

Les études qui s'inscrivent dans l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale sont donc majoritairement quantitatives (Lee et al., 2003 ; Williams et al., 2011). Nous notons toutefois que, plus rarement, les questionnaires développés dans cette approche sont utilisés dans des études qualitatives en nourrissant des guides d'entretien : soit en tant que principale méthode (e.g., tom Dieck et al., 2018), soit en combinaison avec des questionnaires (e.g., Brown et al., 2002).

2.4. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale présente plusieurs intérêts. Premièrement, les modèles ont été développés pour identifier des motifs de rejet ou d'adoption d'une technologie et d'anticiper son utilisation future et cela *a priori* même de son implantation. Pour ce faire, et c'est un autre apport de cette approche, les auteurs mobilisent des échelles de mesure qui permettent une évaluation rapide et systématique de l'acceptabilité

d'une technologie et qui permettent également des comparaisons entre utilisateurs, technologies, contextes.... Enfin, les modèles mobilisés sont robustes, comme en témoignent leurs nombreuses validations empiriques (Atarodi, Berardi, & Toniolo, 2019). Leur parcimonie permet également aux auteurs de les étendre afin de les adapter aux objectifs de leur étude ou de les comparer.

Toutefois, les modèles utilisés restent limités pour expliquer l'utilisation d'une technologie. Premièrement, les modèles mettent principalement l'accent sur les dimensions instrumentales de la technologie pour expliquer les intentions d'usage (Salovaara & Tamminen, 2009). Nous notons tout de même que les évolutions des modèles ont suivi les évolutions de la recherche et que des dimensions non-instrumentales ont été intégrées dans les modèles, qu'ils s'agissent d'extensions des modèles initiaux ou de leurs versions ultérieures (TAM3, UTAUT2). De plus, dans les questionnaires utilisés, ce sont les chercheurs qui identifient l'usage futur de la technologie (« *Je trouve que [telle technologie] est utile pour [tel usage]* »). Pourtant, les technologies peuvent avoir plusieurs usages pour différents utilisateurs, mais également pour un même utilisateur. Les données recueillies n'intègrent donc pas ces différents usages. Il faut noter par ailleurs que l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue sont davantage explicatives de l'usage rapporté que de l'usage objectif, ce qui pose la question de la validité de ce type de mesures (Turner, Kitchenham, Breton, Charters, & Budgen, 2010). Lorsqu'il est évalué, les mesures de l'usage effectif varient entre les chercheurs : il peut s'agir de la fréquence d'utilisation, du nombre d'utilisations total ou encore de la durée de connexion (Salovaara & Tamminen, 2009).

Une autre limite à pointer concerne la focalisation des modèles, qui adoptent majoritairement un point de vue individuel sur l'acceptabilité des technologies. L'approche accorde donc peu de poids aux influences sociales et organisationnelles pouvant s'exercer sur les perceptions des individus et sur l'utilisation des technologies. De la même façon, les études informent peu de l'usage réel et excluent la possibilité que des variables relatives à l'usage effectif, au contexte d'usage ou encore aux activités de l'utilisateur puissent influencer les perceptions des utilisateurs ou leur intention d'utiliser la technologie.

Une autre faiblesse de l'acceptabilité sociale réside dans la temporalité limitée des études. En effet, les utilisateurs sont très peu exposés à la technologie évaluée et les études longitudinales longues sont rares. L'évolution temporelle de l'acceptation de la technologie n'est donc pas prise en compte : par exemple les études ainsi conduites ne relèveraient pas des situations où une technologie initialement adoptée serait abandonnée par la suite.

De manière plus générale, le déterminisme de ces modèles doit être considéré comme leur faiblesse la plus importante. En effet, ces modèles sous-tendent que l'utilisation d'une technologie provient d'une décision rationnelle de l'individu, qui s'appuierait sur les qualités qu'il perçoit de la technologie et qui anticiperait l'usage qu'il en fera. À l'inverse, plutôt que de mettre l'accent sur la rationalité de l'individu pour expliquer l'utilisation de la technologie, on peut toutefois considérer que c'est la situation qui rend possible l'utilisation ou non. De même, la technologie et l'utilisateur sont considérés comme deux entités autonomes. Pourtant, ils s'influencent mutuellement : l'utilisateur s'appropriant la technologie, l'adaptant, et la technologie influençant l'utilisateur et la façon dont il réalise son activité.

3. L'ACCEPTATION SITUÉE : PRENDRE EN COMPTE L'EXPÉRIENCE RÉELLE AVEC LA TECHNOLOGIE

Face aux limites des deux approches de l'acceptabilité présentées précédemment, Bobillier Chaumon & Dubois (2009) (voir également Bobillier Chaumon, 2013, 2016) proposent une troisième approche pour traiter du processus d'acceptabilité des technologies : l'acceptation située. Cette approche s'inscrit dans le réel de l'activité. Elle étudie donc les apports et les limites d'une technologie dans son contexte d'usage, ainsi que son intérêt par rapport à l'activité et aux projets de l'individu. Dans ce cadre, on s'intéresse concrètement à ce que « la technologie "permet/autorise de faire" ou "oblige à faire", mais aussi ce qu'elle "empêche de faire" ou "plus comme avant" et ce, sur différentes dimensions de l'activité » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 12).

Ainsi, l'acceptation située intègre deux aspects habituellement absents des autres approches traitant de l'acceptabilité des technologies : il s'agit du contexte d'usage et de la question de la construction du sens des usages. Pour étayer cette approche, deux paradigmes théoriques sont mobilisés : d'une part, les théories de l'activité et les théories de l'action et, d'autre part, les théories de l'appropriation technologique. Nous présenterons les apports de chacun de ces paradigmes pour étudier l'acceptation située d'une technologie.

3.1. La prise en compte de l'usage réel et du contexte d'usage : les théories de l'activité et les théories de l'action

Les études s'inscrivant dans les approches centrées sur l'acceptabilité pratique et sur l'acceptabilité sociale ne prennent peu (voire pas) en compte le contexte d'usage des technologies. Nous l'avons mentionné auparavant, dans ces études, les perceptions des utilisateurs sont recueillies par le biais de questionnaires sans que ne soit interrogé l'usage réel de la technologie dans son contexte d'usage.

Ainsi, alors que l'acceptabilité sociale s'intéresse aux facteurs d'acceptabilité des technologies en elles-mêmes (par exemple à son utilité et sa facilité d'utilisation perçue dans le TAM), l'approche de l'acceptation située propose « d'évaluer en situation effective de travail ce que les technologies font (apportent), mais aussi ne font pas (ou ne permettent plus de faire), ou défont (en altérant et en dégradant les conditions et les modalités de travail) » (Bobillier Chaumon & Clot, 2016, p. 4). Pour considérer l'expérience réelle des individus avec les technologies, leur vécu et leurs usages effectifs, Bobillier Chaumon (2016) propose de mobiliser les théories de l'activité (Engeström, 2000, 2001; Leontiev, 1974; Vygotski, 1997) et les théories de l'action (Suchman, 1987). L'objectif est alors de comprendre la façon dont l'activité se réalise, dans un contexte donné, et comment ces deux éléments affectent l'acceptation des technologies.

Dans cette partie, nous expliquerons les grands principes des théories mobilisées, afin de pouvoir présenter leurs apports dans l'étude de l'acceptation des technologies. Nous commencerons par résumer les apports de chacune des générations de théories de l'activité décrites par Engeström (2001). La première génération de théories se centre autour des travaux de Vygotski (1997). Il introduit l'idée d'une médiation par les artefacts de la relation entre le sujet et l'objet de son activité (Figure 18).

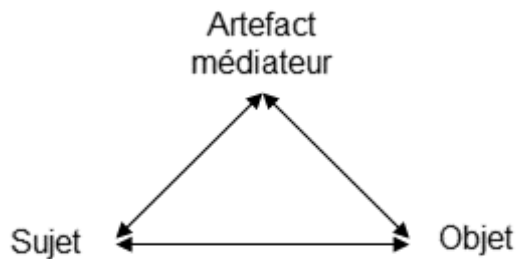


Figure 18. Médiation de la relation sujet-objet par un artefact, selon Vygotski (1997)

La notion d'artefact renvoie à « toute chose ayant subi une transformation, même minime, d'origine humaine » (Rabardel, 1995, p. 49). Vygotski précise que ces artefacts peuvent être des outils techniques (par exemple, un marteau) ou des outils psychologiques (par exemple, une carte ou un plan). Deux types d'outils psychologiques peuvent être distingués : les outils psychologiques physiques (par exemple, les cartes et les plans) et les outils psychologiques symboliques (par exemple, le langage ou l'algèbre), qui dans certains cas n'ont pas d'existence physique.

Vygotski (1930) considère que cette médiation de l'activité humaine par les artefacts est à l'origine de changements fondamentaux des fonctions psychologiques et qu'elle transforme les rapports du sujet au monde. Elle conditionne le développement du sujet en lui permettant d'accéder à un plus large éventail d'activités possibles.

La limite majeure de cette première génération de théories est l'angle individuel qu'elle adopte. La seconde génération de théories répond à cette limite en prenant en compte les activités humaines collectives. Cette génération de théories se centre autour des travaux de Leontiev (1974). L'objectif des travaux de Leontiev est ambitieux : il s'agit de développer une théorie sur le développement de l'esprit, et cela de l'émergence de formes simples de psyché tôt dans l'évolution jusqu'à des formes avancées de conscience (Kaptelinin & Nardi, 2006). Pour explorer cette évolution, il s'appuie sur l'activité humaine, par laquelle la psyché émerge et se développe. Toutefois, ce n'est pas l'étude du développement de l'esprit qui est considérée comme la principale contribution de Leontiev, mais plutôt son travail autour du concept d'activité et de sa structure hiérarchique. Ce sont ces derniers apports qui sont mobilisés par l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2013).

Dans la théorie de Leontiev, et dans les théories de l'activité en général, l'*objet* de l'activité a un rôle central. Il motive et il dirige l'activité tout en distinguant les activités les unes des autres (Kaptelinin & Nardi, 2006). L'activité peut être considérée dans son ensemble comme l'interaction sujet-objet, mais elle peut aussi être entendue dans un sens plus restreint. Ce sens plus restreint réfère à un niveau spécifique de l'interaction sujet-objet où l'objet de l'activité a le statut de *motif* (Kaptelinin & Nardi, 2006), c'est-à-dire que l'objet de l'activité répond à un besoin spécifique du sujet.

Leontiev (1974) décompose toute activité humaine en une structure hiérarchique à trois niveaux (Figure 19) : les opérations, les actions et l'activité (Decortis, Noirfalise, & Saudelli, 2000). L'activité est donc :

composée d'un *sujet* (une personne ou un groupe), d'un *objet* (qui lui donne une orientation consciente et spécifique, et derrière lequel se trouve nécessairement un besoin ou un désir que l'activité doit permettre d'atteindre), d'*actions* (qui correspondent aux processus structurés par les buts conscients) et d'*opérations* (les moyens non conscients mis en œuvre pour l'atteinte d'un but conscient). (Darses, Hoc, & Chauvin, 2004, p. 225).

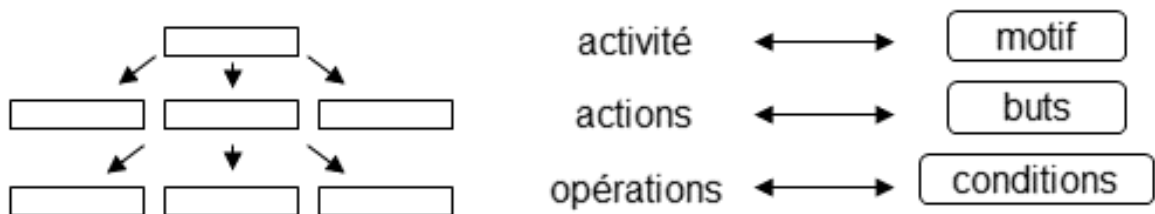


Figure 19. Structure hiérarchique de l'activité, adaptée et traduite de Kaptelinin & Nardi (2006, p. 64)

Les activités ne sont pas directement dirigées vers leurs motifs. L'activité peut comporter une séquence d'étapes qui ne sont pas directement reliées au motif, mais qui peuvent éventuellement avoir pour résultat d'atteindre ce motif. Ces étapes sont des *actions*, qui sont dirigées vers des *buts*. Ces buts sont conscients, contrairement au motif dont les sujets ne sont pas toujours immédiatement conscients. Les actions sont à leur tour décomposées en *opérations*. Ces opérations sont des processus routiniers et automatiques. Ce sont des ajustements de l'action aux *conditions* dans lesquelles elle se réalise.

Ces différents niveaux peuvent évoluer. Par exemple, en gagnant de l'expérience, une action du sujet (donc consciente) peut s'automatiser et devenir une opération. De la même manière, une opération peut perdre son statut de processus automatisé si elle échoue et que le sujet cherche à comprendre les raisons de cet échec et comment y remédier. Les transformations peuvent aussi concerner les actions et l'activité. Par exemple, un but, qui oriente une action, peut accéder au statut de motif et donner à l'action initiale le rôle d'activité.

La médiation de l'activité est l'idée centrale de ces deux premières générations de théories. Folcher et Rabardel (2004) distinguent trois orientations principales de la médiation par les artefacts : vers l'objet de l'activité, vers les autres sujets et vers soi-même. La médiation orientée vers un objet peut avoir deux formes :

- les *médiations épistémiques*, qui visent principalement la prise de connaissance sur l'objet (propriétés, évolutions en fonction des actions du sujet...). Les auteurs prennent l'exemple de l'écran d'un appareil photo pour illustrer cette médiation puisqu'il permet au sujet, en analysant les caractéristiques de l'image, de décider de conserver, de refaire ou de supprimer le cliché qu'il vient de réaliser.
- les *médiations pragmatiques*, qui visent l'action sur l'objet (transformation, régulation...). Les auteurs, toujours en prenant l'exemple de l'appareil photo, illustrent cette médiation par les commandes de l'appareil photo numérique qui permettent la prise de vue (flash, balance des ISO...) et la manipulation des photos (suppression, modification).

L'activité du sujet est également orientée vers les autres. Tout comme pour la médiation orientée vers les objets, elle peut avoir une forme épistémique et viser à

prendre des informations sur l'autre ou elle peut être pragmatique et viser à agir sur l'autre.

Enfin, l'activité du sujet est tournée vers lui-même. Ces médiations lui permettent de se connaître et de se transformer. On désigne par *médiations réflexives* le rapport du sujet à lui-même, médiatisé par l'instrument. Par exemple, dans l'exemple de l'appareil photo donné par Folcher et Rabardel (2004), les autoportraits peuvent illustrer ces médiations réflexives épistémiques ; elles peuvent par exemple renseigner l'individu sur son apparence à un instant donné.

La troisième génération des théories de l'activité se développe autour des systèmes d'activités. Les travaux d'Engeström s'inscrivent dans cette approche (Engeström, 2000, 2001, 2014). Il étend les théories de l'activité pour les appliquer au fonctionnement des systèmes d'activité collective, médiatisée par un artefact et orientée vers un objet. Dans la théorie qu'il développe, le sujet et les artefacts s'inscrivent dans un système d'activité dynamique (Figure 20).

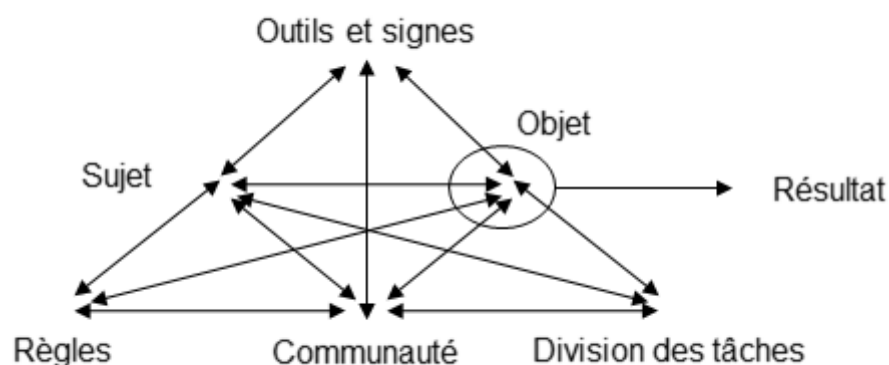


Figure 20. Structure d'un système d'activité, traduit de Engeström (1987, p. 78)

Il décompose la situation de travail à partir de la relation sujet-artefacts-objet déjà théorisée par Vygotski et Leontiev. Le triangle en haut de la figure peut être vu comme la « partie émergée de l'iceberg » qui représente les actions de l'individu et du groupe dans le système d'activité. L'ovale autour de l'objet indique que les actions orientées vers l'objet sont toujours caractérisées par l'interprétation et le sens donné à ces actions. La partie inférieure du schéma illustre la dimension sociale et collective de l'activité. En effet, le système d'activité comprend également :

- les *outils et des signes* qui sont à l'origine des artefacts qui médiatisent l'activité ;
- les *règles*, qui régissent socialement l'activité ;
- la *communauté* qui renvoie au collectif d'individus qui partagent le même objet ;
- la *division du travail* qui renvoie à l'organisation et à la répartition des tâches.

La théorie d'Engeström peut être résumée en cinq principes (Engeström, 2001). Le premier principe définit l'unité de base de l'analyse comme un système d'activité collectif, médiatisé par les artefacts et orienté vers un objet. Le second principe concerne la polyphonie des systèmes d'activité, c'est-à-dire que les systèmes d'activité comprennent un ensemble de points de vue, d'histoires et d'intérêts. Ses

différents points de vue proviennent de la division du travail et se répercutent sur les règles et les artefacts du système d'activité. Le troisième principe est l'historicité. L'activité prend forme et se transforme au cours du temps. Pour comprendre les problèmes d'un système d'activité et ses potentialités, il faut prendre en compte l'histoire locale (celle du système d'activité étudié) ainsi que l'histoire plus générale des idées et des outils qui ont façonné l'activité. Le quatrième principe réfère au rôle central des contradictions, qui sont vues comme des sources de changement et de développement. Par exemple, quand un système d'activité intègre un élément extérieur, comme une nouvelle technologie, cela entraîne des contradictions avec des éléments anciens du système d'activité, comme les règles ou la division du travail. Ce type de contradictions entraîne des perturbations du système, mais elles sont également à l'origine de tentatives innovantes pour modifier l'activité. Enfin, le cinquième principe concerne les transformations expansives des systèmes d'activité. Ils passent en effet par de longs cycles de transformations. Par exemple, avec l'accumulation des contradictions, les sujets des systèmes d'activité peuvent s'écarter des règles établies, ce qui peut entraîner, dans certains cas, un changement collectif des règles. On désigne par « transformations expansives » les situations où l'objet et le motif de l'activité sont radicalement repensés pour atteindre des possibilités plus larges que le système d'activité initial.

Ces trois générations de théories de l'activité ouvrent sur trois types de perspectives dans l'étude de l'acceptation des technologies (Bobillier Chaumon, 2013). Premièrement, l'acceptation située considère que les technologies sont des artefacts techniques qui médiatisent la relation entre un sujet et l'objet de son activité. Par conséquent, l'acceptation d'une technologie ne peut pas être étudiée sans prendre en compte la manière dont se réalise l'activité et sans comprendre ses objets, le développement de cette activité ainsi que son contexte social et collectif. La deuxième perspective qu'ouvrent ces théories concerne l'objet de l'activité. Cet objet est appréhendé différemment selon l'expérience de l'utilisateur, son parcours ou encore sa catégorie socio-professionnelle. Dès lors, l'acceptation d'une technologie dépend de sa capacité à réaliser l'objet de l'activité, mais également de sa capacité à s'adapter aux différences entre les sujets et aux modifications dans l'activité. Enfin, l'introduction d'une technologie peut être considérée comme une contradiction au sens des systèmes d'activité (nous avons présenté les contradictions comme le quatrième principe des systèmes d'activité). Elle entraîne alors le changement du système d'activité. Pour étudier l'acceptation des technologies, il faut alors appréhender les transformations de l'activité qu'entraînent les technologies et la manière dont les individus pensent ces transformations.

L'acceptation située mobilise un autre courant théorique, qui est celui de l'action située, généralement associé aux travaux de Suchman (1987). Cette théorie est une remise en cause du paradigme computo-représentationnaliste, alors dominant à l'époque, qui définit l'homme comme un système de traitement de l'information, par analogie avec l'informatique (Relieu, Salembier, & Theureau, 2004; Gérard Valléry, 2004). Suchman met l'accent sur l'ancrage matériel et social de l'action et sur le rôle fondamental des facteurs contextuels. Dans cette perspective, l'action des individus ne dépend pas de la façon dont ils traitent l'information ou de plans préétablis ; elle est opportuniste et improvisée, c'est-à-dire qu'elle dépend de « circonstances locales et changeantes, qui ne peuvent être toujours contrôlées et planifiées par les acteurs » (Gérard Valléry, 2004, p. 122). Toute action ne peut alors se comprendre que dans

son contexte d'élaboration, c'est-à-dire la *situation*, en intégrant les facteurs physiques, sociaux ou encore culturels qui déterminent ce contexte.

Nous pouvons résumer les apports des théories de l'activité et des théories de l'action dans l'étude de l'acceptation des technologies en deux points. En premier lieu, les théories de l'activité requièrent, pour étudier l'acceptation des technologies, d'adopter une approche compréhensive, en considérant les technologies comme des artefacts qui médient l'activité des sujets, mais également qui peuvent être à l'origine de contradictions et de transformations des systèmes d'activité. En second lieu, les théories de l'action amènent à considérer les facteurs contextuels des usages des technologies et à adopter une vision située de ces usages. Dans cette perspective, ces théories conduisent à ne pas adopter une vision déterministe des intentions d'usage, comme peuvent le proposer les modèles de l'acceptabilité sociale (bien qu'elles puissent jouer un rôle dans l'orientation des conduites des individus), mais plutôt à s'intéresser aux usages réels et situés des technologies pour appréhender leur acceptation.

Nous avons montré ici comment l'acceptation située mobilise les théories de l'activité et les théories de l'action. Elle intègre également la question de la construction du sens des usages par les utilisateurs, en s'intéressant à l'appropriation technologique. Ce sont les éléments que nous présenterons dans la partie suivante.

3.2. La prise en compte de la construction du sens des usages : l'appropriation technologique

Les modèles de l'acceptabilité sociale cherchent à prédire les intentions d'utiliser une technologie par le biais de questionnaires sans reconnaître la possibilité que des utilisateurs puissent inventer de nouveaux usages à la technologie (Salovaara & Tamminen, 2009). Par ailleurs, ces modèles, en s'inscrivant dans des temporalités limitées, n'envisagent pas que le rapport de l'individu à la technologie puisse évoluer au fil des usages. Pour ces raisons, il est nécessaire d'intégrer à l'étude de l'acceptation des technologies la question de l'appropriation. Nous présenterons dans cette partie deux apports théoriques majeurs : ceux de la genèse instrumentale (Folcher & Rabardel, 2004; Rabardel, 1995) et ceux du constructivisme social (Dourish, 2003; Orlikowski, 1992, 2000). Comme nous l'avons fait précédemment, nous commencerons par présenter ces théories avant de résumer leurs apports pour l'étude de l'acceptation des technologies.

Rabardel (1995) traite de la question de l'appropriation des artefacts par la théorie de la genèse instrumentale. Cette théorie se centre autour de différentes notions : l'instrument, les schèmes d'utilisation, l'instrumentation et l'instrumentalisation. L'instrument est considéré comme une « entité mixte » qui renvoie à la fois au sujet et à l'artefact. Dans cette perspective, on conçoit qu'un instrument intègre deux dimensions. Il comprend, d'une part, *l'artefact matériel et symbolique* et, d'autre part, *le ou les schèmes d'utilisation* associés à cet artefact. Ces deux dimensions de l'instrument sont liées, mais également indépendantes l'une de l'autre : un même schème d'utilisation peut s'appliquer à des artefacts différents et un même artefact peut s'insérer dans des schèmes d'utilisation différents. Par exemple, les schèmes de la conduite automobile peuvent être transposés à différents véhicules, et un artefact tel qu'un livre peut, en plus d'être lu, faire office de presse-papier ou de dessous de verre.

Rabardel (1995) distingue trois niveaux au sein des schèmes d'utilisation :

- les schèmes d'usage, qui sont composés d'actions et d'activités directement liées à l'artefact (par exemple, appuyer sur la pédale d'accélérateur d'une voiture) ;
- les schèmes d'action instrumentée qui comprennent différents schèmes d'usage et qui visent à opérer des transformations sur l'objet de l'activité (par exemple, la conduite d'une voiture pour se rendre à une destination donnée) ;
- les schèmes d'activité collective instrumentée qui portent, d'une part, sur la définition des types d'action et des résultats acceptables et, d'autre part, sur la coordination des actions individuelles et sur l'intégration des résultats de ces actions pour l'atteinte d'un but commun (par exemple, le partage de la route, en intégrant les actions des autres usagers de la route pour atteindre la destination visée en toute sécurité).

Ces différents éléments permettent à Rabardel (1995) de théoriser le processus de *genèse instrumentale*. Cette dernière expression fait référence à l'évolution d'un artefact (matériel ou symbolique) en un *instrument* (à la fois artefactuel et subjectif, qui médiatise l'activité). La genèse instrumentale est envisagée par le biais de deux processus : l'instrumentation et l'instrumentalisation. L'*instrumentation* est relative au sujet. Elle correspond à l'émergence de nouveaux schèmes d'utilisation et à l'évolution de schèmes d'utilisation existants. Par exemple, l'introduction des écrans tactiles a fait émerger et évoluer nos schèmes d'utilisation. Désormais, nous utilisons le déplacement de notre index de bas en haut de l'écran de notre smartphone pour faire défiler du texte et nous transposons ce schème d'utilisation à d'autres artefacts (tablettes tactiles, terminaux tactiles dans les gares, etc.). L'*instrumentalisation* est orientée vers l'artefact : il s'agit de l'émergence et de l'évolution de certaines composantes de l'artefact (sélection et regroupement de fonctions, transformation de l'artefact, attribution de propriétés, etc.). L'utilisation du rétroéclairage de l'écran de son smartphone pour s'éclairer dans l'obscurité en est un exemple.

Certaines théories issues du constructivisme social ont également traité de la question de l'appropriation des technologies, qu'elles définissent comme le processus par lequel des individus adoptent et adaptent les technologies pour les intégrer à leurs activités de travail (Dourish, 2003). Les travaux sur l'appropriation des technologies reposent principalement sur deux idées. La première renvoie à l'idée que les utilisateurs modifient la technologie : ils la reconfigurent pour répondre à des besoins spécifiques, mais ils ont aussi des usages de la technologie qui n'avaient pas été prévus par les concepteurs ou encore pour des fins différentes (Dourish, 2003). Akrich (1998) décrit quatre types de modifications des objets : le déplacement, l'adaptation, l'extension et le détournement. Le *déplacement* consiste à modifier les usages prévus, sans en créer d'autres, en s'appuyant sur les caractéristiques d'un dispositif (par exemple, le sèche-cheveu, parce qu'il souffle de l'air chaud, utilisé pour sécher un vernis à ongles). L'*adaptation* consiste à modifier le dispositif pour l'ajuster à ses caractéristiques et à son environnement (par exemple, le fait de régler en hauteur et en profondeur son siège de voiture). On parle d'*extension* lorsqu'un dispositif conserve sa forme et ses usages de départ, mais qu'on lui adjoint des nouvelles fonctions (par exemple, utiliser les brouillons de ses SMS pour sauvegarder une liste de courses). Le *détournement* réfère aux situations où l'utilisateur fait un usage de l'objet qui n'avait pas été prévu par les concepteurs et que cet usage empêche un retour à son usage précédent (par exemple, la récupération d'objets usagés dans le domaine de l'art).

La seconde idée des travaux sur l'appropriation est que la technologie n'a ni sens ni valeur en elle-même, mais que ce sont les utilisateurs qui construisent et reconstruisent socialement les technologies et qui leur donnent du sens dans l'usage. Pour illustrer cette idée, nous nous appuyons sur les travaux d'Orlikowski (1992) et de DeSanctis et Poole (2008). Ces deux théories s'inscrivent dans une approche structurationnistes, sur la base de la théorie de la structuration de Giddens (1984). Les structures sont au cœur de cette théorie et sont définies comme les règles et les ressources mobilisées par les individus dans leurs pratiques. Pour Giddens, il existe une dualité des structures : d'une part, elles permettent et contraignent les actions humaines et, d'autre part, elles sont créées par l'action humaine.

Orlikowski (1992) et DeSanctis et Poole (2008) s'appuient sur cette théorie pour étudier le rôle des technologies dans les organisations. Nous résumerons les apports des travaux d'Orlikowski (1992) autour de deux notions : la dualité de la technologie et la flexibilité interprétative. La dualité de la technologie renvoie à l'idée d'une fausse dichotomie entre la technologie pensée soit comme un artefact matériel soit comme un produit construit socialement. En effet, la technologie est construite physiquement, par les concepteurs, dans un contexte social donné, mais elle est également construite socialement, par les utilisateurs, selon les significations qu'ils lui donnent et les différentes caractéristiques qu'ils utilisent et qu'ils mettent en avant. Le second apport de cette théorie, la flexibilité interprétative, renvoie à l'idée que la technologie n'est pas figée, mais qu'elle est modifiable et modifiée au fil de son existence. Ces modifications dépendent des caractéristiques matérielles de l'artefact (par exemple, les interfaces matérielles et logicielles qui composent la technologie), des caractéristiques des individus (par exemple, l'expérience et la motivation) et des caractéristiques des contextes de conception et d'utilisation (par exemple, les relations sociales, les ressources allouées et la répartition des tâches). Dans le même ordre d'idée, DeSanctis et Poole (2008) proposent la théorie de la structuration adaptative. Elle repose sur l'idée qu'il existe des structures inhérentes à la technologie – telle que la créent les concepteurs – et des structures qui émergent dans l'usage – selon les actions humaines et le contexte socio-organisationnel.

Pour résumer, nous voyons trois apports principaux des théories de l'appropriation technologie pour l'étude de l'acceptation située des technologies. Premièrement, la technologie n'a pas de sens en soi ; les utilisateurs lui donnent sens dans l'usage (DeSanctis & Poole, 2008; Orlikowski, 1992). Deuxièmement, les technologies ne sont pas figées : elles évoluent au fil des usages, les utilisateurs les modifient, les adaptent à des schèmes d'usage existants et à leurs activités. Enfin, l'appropriation des technologies entraîne à la fois des transformations de l'individu (par un processus d'instrumentalisation), mais également des transformations de l'organisation par l'émergence de structures, telles que décrites par DeSanctis et Poole (2008).

Nous avons ici résumé les fondements théoriques de l'acceptation située. Dans la partie suivante, nous présenterons les dimensions que cette approche propose de prendre en compte dans l'étude de l'acceptation d'une technologie.

3.3. Les dimensions prises en compte dans l'acceptation située

Bobillier-Chaumon (2016) a mis en évidence quatre grandes dimensions qui semblent pertinentes pour étudier l'acceptation située des technologies. Elles ont été définies à partir de méta-analyses sur les conditions d'usage et d'adoption des technologies

(Bobillier Chaumon & Dubois, 2009) ainsi que des recherches qu'il a menées sur le déploiement des technologies en situation professionnelle (Bobillier Chaumon, 2013). Ces quatre dimensions sont la dimension individuelle (ou personnelle), la dimension organisationnelle (ou méta-personnelle), la dimension relationnelle (ou interpersonnelle) et la dimension professionnelle et identitaire (ou transpersonnelle). À partir de ces dimensions, il met en évidence différentes situations qui peuvent conduire au rejet d'une technologie.

3.3.1. La dimension individuelle (ou personnelle)

La *dimension individuelle* concerne les activités propres de l'individu. On s'intéresse aux diverses contraintes que génère la technologie sur l'individu et son activité, et plus particulièrement à la charge cognitive et à la charge émotionnelle.

Les effets des technologies sur la charge cognitive sont de trois types. En premier lieu, l'usage de la technologie peut générer une densification de l'activité (ou une surcharge quantitative de travail) qui provient notamment d'un certain nombre d'interruptions de tâche, de digressions, de fragmentations du travail ou encore de situations de multi-activité. En effet, les individus font face à un volume croissant et rapide d'informations. Afin de répondre à ces exigences, ils sont obligés d'adopter une cadence de travail soutenue et une activité variée et fragmentée. Le deuxième effet des technologies sur la charge cognitive renvoie à l'intensification du travail (ou la surcharge qualitative de travail). Elle survient lorsque les technologies requièrent que les individus mobilisent de nouvelles compétences, des compétences différentes de celles qu'ils mobilisent habituellement, ou encore quand elles rendent difficile le fait de transférer des compétences mobilisées dans l'usage de l'ancien dispositif à un nouveau. Enfin, les technologies peuvent entraîner une sous-charge cognitive, dans les cas où les compétences des salariés sont peu sollicitées. En effet, les technologies peuvent exercer un fort contrôle sur l'activité des salariés et leur donner le sentiment qu'ils doivent uniquement se plier à leurs injonctions.

La dimension individuelle de l'acceptation située s'intéresse également aux effets des technologies sur la charge émotionnelle. Ces effets peuvent être de deux types. En premier lieu, l'usage des technologies peut avoir des conséquences émotionnelles telles que des sentiments de gêne, de frustration, d'anxiété ou encore de déception. En second lieu, les technologies peuvent empêcher les individus d'exprimer leurs émotions ou encore les prescrire.

3.3.2. La dimension organisationnelle (ou méta-personnelle)

La *dimension organisationnelle* renvoie aux rapports des individus avec l'organisation du travail et plus particulièrement aux conséquences de l'implantation des technologies sur le système de contrôle et sur l'autonomie des salariés. Deux types de répercussions majeures ont été identifiées (Bobillier Chaumon, 2013, 2016) : la *prescription de la rationalité* et la *prescription de la subjectivité*.

La prescription de la rationalité renvoie à la régulation et à la prescription de l'activité par les technologies. Elles peuvent notamment imposer des règles, des procédures et des manières de fonctionner aux individus. On parle d'un surplus d'hétéronomie pour qualifier ces situations où des règles extérieures sont imposées aux individus. Par ailleurs, elles peuvent servir à le contrôler l'activité des individus en s'appuyant sur différents indicateurs, plus ou moins pertinents, comme les traces de connexions, les heures d'envoi des mails, le nombre de dossiers saisis, les

localisations GPS, etc. Les individus peuvent donc être méfiants vis-à-vis des technologies qui, au lieu de les assister dans leur travail, peuvent les diriger et les contrôler.

La prescription de la subjectivité concerne l'autonomie des salariés. Les technologies peuvent leur imposer une certaine forme d'autonomie en les poussant à s'appuyer sur les technologies pour faire leur travail, à faire preuve d'initiative, à être plus réactifs et plus proactifs. Cette autonomie peut être vécue positivement par certains salariés, mais également être à l'origine de souffrances pour d'autres. En effet, pour certains salariés cette autonomie imposée peut être déstabilisante, notamment s'ils n'ont pas la capacité pour faire face à ces nouvelles responsabilités, ou la volonté de les assumer.

3.3.3. La dimension relationnelle (ou interpersonnelle)

La troisième dimension de l'acceptation située est une *dimension relationnelle* (ou interpersonnelle). Elle renvoie à la manière dont les technologies peuvent affecter les activités collectives et collaboratives dans le travail. Elles peuvent imposer un collectif de travail, en prescrivant la coopération, plutôt qu'en soutenant le collectif de travail existant. À terme, ces reconfigurations peuvent fragiliser les collectifs. Par ailleurs, elles peuvent mettre en concurrence les individus, notamment par le biais des indicateurs de performance que nous avons évoqués précédemment. Ces indicateurs ne prennent pas en compte le réel de l'activité (les essais, la préparation, la réflexion, etc.), mais s'appuient uniquement sur le résultat visible du travail. Ils poussent les individus à se comparer les uns aux autres et à entrer parfois dans des logiques de compétition. Enfin, elles peuvent reconfigurer les réseaux de travail existant et accorder de nouveaux rôles et de nouvelles responsabilités aux individus, sans être nécessairement en adéquation avec leurs objectifs personnels.

3.3.4. La dimension professionnelle et identitaire (ou transpersonnelle)

La quatrième dimension du processus d'acceptation est une *dimension professionnelle et identitaire* (ou transpersonnelle). Elle renvoie à la capacité des technologies à faire reconnaître ou à mettre en valeur la contribution de l'individu. Deux processus peuvent affecter la reconnaissance identitaire de l'individu : la perte de sens au travail et la déqualification professionnelle.

La perte de sens au travail provient de l'éloignement de l'individu de son objet de travail alors que les technologies prennent une part de plus en plus significative et valorisante dans l'activité. Ce sont elles qui produisent un travail de qualité, alors que les opérateurs doivent parfois uniquement suivre des règles et des procédures sans pouvoir mobiliser leur expérience et leur savoir-faire. Pour parvenir à faire un travail qu'ils considèrent comme un travail de qualité, ils sont parfois contraints de contourner les règles du système, ce qui est usant psychologiquement, mais également risqué, car ils peuvent s'exposer à des critiques et des sanctions de la part de l'organisation. Par ailleurs, les technologies peuvent également affecter le sens que les opérateurs donnent à leur travail, puisque dans certains cas elles les contraignent à transgresser des règles du métier ou à effectuer des tâches qui vont à l'encontre de leur conception de leur activité. La perte de sens au travail peut également provenir de ce que les salariés ne font plus, de leur incapacité à exercer pleinement leur métier. On

s'intéresse dans ce cas à ce que les salariés ne peuvent pas ou plus faire en raison des prescriptions ou des sanctions données par les technologies.

Le deuxième processus qui affecte la dimension identitaire est la déqualification. En effet, certaines technologies peuvent conduire à une perte de savoir-faire ou à effectuer des tâches à faible valeur ajoutée. Néanmoins, elles peuvent également requalifier les salariés, en leur donnant de nouvelles responsabilités et de nouveaux rôles et en les amenant à développer de nouvelles compétences.

3.4. Les méthodes mobilisées par l'approche centrée sur l'acceptation située

Les études s'inscrivant dans l'approche centrée sur l'acceptation située mobilisent principalement des méthodes qualitatives pour la description et la compréhension de l'activité (Bobillier Chaumon, 2013). Trois types de méthodes peuvent être mobilisées (Bobillier Chaumon, 2016) : des méthodes subjectives, des méthodes objectives et des méthodes prospectives. L'objectif de chacune des méthodes et de leur combinaison est d'apporter des éléments de connaissance sur l'expérience réelle des utilisateurs avec les technologies, et plus précisément de comprendre ce qu'ils font réellement, ce qu'ils cherchent à faire ou ce qu'ils n'arrivent pas ou plus à faire depuis l'introduction des technologies dans leur activité.

Nous relevons notamment le recours à des entretiens semi-directifs (e.g., Codreanu, Michel, Bobillier-Chaumon, & Vigneau, 2015), à des entretiens d'explicitation (e.g., Crouzat & Bobillier Chaumon, 2017), à la méthode des incidents critiques (e.g., Poupon, Philipps-Bertin, Bobillier Chaumon, & Kalampalikis, 2017) ou encore des observations de l'activité instrumentée (Bobillier Chaumon, Cuvillier, Sarnin, & Vacherand-Revel, 2013) qui peuvent être parfois accompagnées d'entretiens d'auto-confrontation (Bobillier Chaumon et al., 2014).

3.5. Apports et limites de l'approche centrée sur l'acceptation située

Nous voyons plusieurs apports de l'acceptation située. Premièrement, contrairement à l'acceptabilité pratique, elle prend en compte la question de la subjectivité de l'utilisateur et du sens qu'il donne à la technologie. Elle choisit également une perspective plus englobante que la simple interaction homme-technologie en étudiant la manière dont la technologie est intégrée aux activités de l'utilisateur et comment elle peut les modifier.

De plus, alors que l'acceptabilité sociale s'appuie sur des perceptions générales et *a priori* sur les technologies pour prédire leur utilisation, l'acceptation située donne la primauté au contexte. En effet, dans cette perspective, on considère que c'est la situation qui explique qu'un individu utilise ou non une technologie. On s'intéresse à ce que la technologie permet à l'utilisateur de faire, ce qu'elle l'oblige à faire différemment et ce qu'elle l'empêche de faire. On s'éloigne donc d'une acceptation attendue et projetée (ce que propose l'acceptabilité sociale) pour s'inscrire dans une acceptation située, telle qu'elle se fait réellement dans un contexte donné.

L'acceptation située intègre également la question de l'évolution temporelle de l'acceptation d'une technologie, qui est là aussi quasiment absente des autres approches. D'une part, elle considère que la technologie n'est pas figée, et qu'elle peut évoluer au cours des usages lorsque les utilisateurs se l'approprient. D'autre part,

elle est vigilante aux évolutions possibles de l'acceptation d'une technologie. En effet, il peut exister une rétroaction des usages sur les perceptions des utilisateurs, c'est-à-dire que la manière dont ils perçoivent la technologie peut évoluer à force d'utilisations. Par exemple, un utilisateur peut juger une technologie difficile à utiliser au premier abord et la trouver simple d'utilisation après plusieurs semaines d'utilisation. De la même façon, une technologie initialement acceptée peut finir par être rejetée.

Nous pointons par ailleurs différentes limites à l'acceptation située. La première est une contrepartie de l'approche compréhensive de l'acceptation. En effet, puisque les motifs d'acceptation et de rejet des technologies dépendent des situations, des utilisateurs et du contexte, il n'est pas possible de construire un modèle général de l'acceptation (Bobillier-Chaumon, 2013). De la même façon, les différentes dimensions présentées auparavant peuvent ne pas avoir le même poids selon les individus, ce qui requiert nécessairement une lecture subjective de l'acceptation. Un individu peut par exemple donner la primauté aux changements dans la charge de travail provoqués par la technologie, alors que pour d'autres c'est davantage la dimension organisationnelle qui aura de l'importance. Par ailleurs, certaines de ces dimensions peuvent être plus valorisées à un moment qu'à un autre, ce qui requiert d'étudier l'évolution temporelle de l'acceptation d'une technologie, alors que les modèles de l'acceptation située ont tendance à formaliser dans un modèle un état des lieux de l'acceptabilité d'une technologie à un instant *t*.

La seconde limite de l'acceptation située est d'ordre méthodologique. En effet, alors que l'approche préconise une démarche compréhensive, contextualisée et située, elle donne peu d'informations sur la manière d'étudier les différentes dimensions des motifs d'acceptation et de rejet des technologies. En effet, il nous paraît difficile d'interroger l'ensemble des critères présentés dans chacune des dimensions. Il faudra alors déterminer sur quelles dimensions se focaliser en premier lieu, et ce, d'autant plus que les utilisateurs, comme nous l'expliquions précédemment, peuvent donner la primauté à des dimensions différentes.

Enfin, nous pensons que l'acceptation située donne des éléments clés sur les motifs de rejet des technologies, mais moins sur les motifs d'acceptation des technologies, qui sont davantage à tirer des motifs de rejet identifiés.

4. ARTICULATION DES TROIS APPROCHES THÉORIQUES DE L'ACCEPTABILITÉ DES TECHNOLOGIES

Les trois approches de l'acceptabilité des technologies que nous avons présentées dans cette partie – l'acceptabilité pratique, l'acceptabilité sociale et l'acceptation située – peuvent être complémentaires (Bobillier Chaumon, 2016) dans la recherche et dans les interventions. En effet, chacune de ces approches apporte des éclairages et des recommandations, et cela de la conception du produit jusqu'à son utilisation réelle dans les situations de travail.

L'approche centrée sur l'acceptabilité pratique guide la conception de technologies utiles, utilisables et accessibles. Aujourd'hui, elle intègre également des dimensions non-instrumentales, afin de proposer des technologies dont les interactions avec l'homme sont optimisées, mais qui lui apportent également des expériences de qualité. Une fois la technologie conçue, l'acceptabilité sociale permet d'évaluer les perceptions et les intentions d'usage de la technologie future pour identifier les freins, mais également les leviers à son implémentation. Enfin, une fois

la technologie implantée, l'acceptation située renseigne sur les conditions favorables et défavorables de l'implantation de la technologie.

Il faut ajouter à ces trois étapes des boucles de rétroaction ; chacune des approches se nourrissant l'une l'autre. Ainsi, des perceptions négatives sur une technologie ou des intentions d'usage très faibles pourront amener les concepteurs à concevoir différemment le système. De la même manière, des conséquences défavorables de l'implantation de la technologie pourront avoir des impacts sur les perceptions des utilisateurs à son égard et sur les intentions de l'utiliser à nouveau. Il est donc nécessaire de considérer avec attention chacune des finalités de ces approches : des interactions adaptées à l'homme, des perceptions positives et l'intention d'utiliser la technologie, et une technologie qui s'insère dans les activités de l'utilisateur sans les dégrader, mais en lui permettant de se développer.

Nous avons présenté les trois approches théoriques de l'acceptabilité, les méthodes qu'elles mobilisent, leurs apports et leurs limites. Nous avons également donné des éléments sur les liens entre ces trois approches et sur leurs complémentarités. Nous clôturons ce chapitre sur l'acceptabilité des technologies en abordant des questions fréquemment absentes des théories sur l'adoption technologique. Il s'agit de la résistance à la technologie, de son rejet et de son non-usage.

5. QUID DE LA RÉSISTANCE À LA TECHNOLOGIE, DU REJET ET DU NON-USAGE ?

Contrairement à la notion d'acceptabilité, les notions de résistance aux technologies, de rejet et de non-usage ont été peu traitées dans la littérature scientifique (Boudokhane, 2006; Kellner, Massou, & Morelli, 2010; Laumer & Eckhardt, 2012). Elles sont souvent pensées comme des phénomènes opposés à l'acceptabilité, sans qu'elles ne soient réellement étudiées comme des phénomènes propres. Dans les approches théoriques de l'acceptabilité présentées précédemment, et plus particulièrement pour l'acceptabilité pratique et pour l'acceptabilité sociale, on devine la question du rejet technologique plus qu'elle n'est réellement intégrée et expliquée. À l'inverse, l'acceptation située relève différents motifs expliquant le rejet d'une technologie, puisqu'elle les intègre dans les différentes dimensions de l'acceptation. Il nous semble intéressant de traiter cette question dans cet état de l'art sur l'acceptabilité des technologies. Nous proposons de nous arrêter ici sur ce qui caractérise ce phénomène et sur quelques éléments théoriques qui l'expliquent.

Laumer et Eckhardt (2012) ont conduit une revue de la littérature sur les théories de la résistance de l'utilisateur (*user resistance*). Ils distinguent les notions de résistance, de rejet et de non-adoption. La *résistance* est définie comme une action ou une inaction délibérée avec laquelle un individu s'oppose à ou évite l'implantation d'une technologie. La résistance s'exprime par des comportements de rejet ou de non-adoption. Le *rejet* est la décision délibérée de l'utilisateur d'éviter un système alors qu'à l'inverse, dans la *non-adoption* l'individu n'utilise pas un système, mais s'autorise une future adoption. On peut également classer les comportements de résistance en quatre catégories :

- *l'apathie*, qui renvoie à l'inaction de l'individu, à sa distance envers la technologie, à son manque d'intérêt pour celle-ci ;

- *la résistance passive*, qui comprend des stratégies de retardement de l'utilisation, des excuses, de la persistance d'un comportement antérieur (par exemple, utiliser l'ancienne technologie) et de l'évitement ;
- *la résistance active*, qui renvoie à des comportements forts, mais non agressifs, tels que le fait d'exprimer un désaccord, de demander aux autres d'intervenir ou de former des coalitions ;
- *la résistance agressive*, qui comprend les luttes, les grèves, le boycott, le sabotage et la destruction de la technologie.

Différentes théories ont été développées pour expliquer la résistance aux technologies. Elles mettent en évidence différents facteurs explicatifs. Ces facteurs sont relatifs :

- à des caractéristiques individuelles (âge, genre, sentiment d'efficacité, personnalité...) ;
- au contexte (caractéristiques organisationnelles, interventions managériales, politique de conduite du changement) ;
- à l'influence sociale, c'est-à-dire à l'influence de l'entourage professionnel (collègues, hiérarchie) et personnel (parents, conjoints, amis...) ;
- aux croyances et aux attitudes envers la technologie (perceptions de menaces, inhibiteurs, impressions de perte de pouvoir...) ;
- à la résistance au changement (changements organisationnels) ;
- au sentiment d'équité (avant et après l'implantation et par comparaison à d'autres individus).

Toutefois, les éléments explicatifs ainsi énoncés sont issus d'un nombre réduit d'études. En effet, Laumer et Eckhardt (2012) s'appuient majoritairement sur neuf théories qui ne sont pas toujours accompagnées d'études empiriques. Par conséquent, il est encore nécessaire d'investiguer la résistance aux technologies afin d'en proposer une théorie plus développée.

De la même manière, Murthy et Mani (2013) donnent des explications au rejet des technologies. Ils distinguent trois niveaux de rejet d'une technologie : l'individu, la communauté et la société. Dans leur article, ils se centrent sur les facteurs individuels de rejet. Ils en identifient cinq. Le premier est relatif à la complexité perçue de la technologie : on considère qu'une technologie difficile à comprendre et à utiliser sera rejetée. Le second facteur est la lassitude vis-à-vis des technologies (*technology fatigue*), qui renvoie à l'idée que les individus peuvent se lasser d'un trop-plein de technologies et décider de ne pas en adopter de nouvelles. Cette lassitude s'explique de différentes raisons : les individus évitent les technologies qui présentent trop de fonctionnalités ; ils ont tendance à attendre et à observer avant d'utiliser, par exemple, ils patientent donc jusqu'à ce que les prix baissent ou que les bugs soient corrigés ; le développement des technologies ne suit pas toujours la demande : certaines sont donc jugées inutiles ; les individus ont un choix trop étendu de technologies, qu'ils n'acquièrent pas de peur de regretter leur achat. Le troisième facteur du rejet individuel décrit par les auteurs est le niveau de flexibilité de la technologie : elle doit pouvoir s'adapter aux habitudes de l'individu. Le quatrième facteur est relatif au symbolisme de la technologie : certains individus s'affirment en rejetant ou en adoptant certaines technologies. Enfin, les individus peuvent envisager que le changement d'une technologie à une autre est trop coûteux et demande trop d'efforts.

Par ailleurs, d'autres auteurs se sont intéressés au non-usage. Boudokhane (2006), pour identifier trois formes de non-usage, s'appuie sur la définition de l'usage donnée par Breton et Proulx (2002). Selon cette définition, il existe trois temps à l'usage : l'adoption, l'utilisation et l'appropriation. L'adoption est la première étape de l'usage et correspond majoritairement à l'achat de la technologie. L'utilisation renvoie simplement à l'emploi de la technologie. L'appropriation réunit trois conditions. D'abord, elle nécessite (1) une maîtrise technique et cognitive de la technologie, (2) qu'elle soit intégrée à des pratiques existantes, et (3) qu'elle donne lieu à des détournements, à des réinventions de la technologie. Les trois formes de non-usage correspondent donc à :

- la non-adoption, c'est-à-dire le fait de ne pas acheter une technologie ;
- la non-utilisation, c'est-à-dire le fait de posséder une technologie sans l'utiliser ;
- la non-appropriation, c'est-à-dire à l'absence de maîtrise de l'outil.

En s'appuyant sur des théories issues de la sociologie, de la psychologie sociale, des sciences de gestion et des sciences de l'information et de la communication, Boudokhane explique le non-usage selon deux catégories de facteurs : les caractéristiques de la technologie (par exemple, les attributs de la théorie de la diffusion des innovations de Rogers [1995] : désavantages relatifs, incompatibilité, etc.) et les caractéristiques du non-usager (par exemple, le sentiment d'auto-efficacité, les variables sociodémographiques, etc.).

Alors que la typologie de Boudokhane (2006) renvoie à trois temps dans le non-usage, les six typologies de non-usage décrites par Satchell & Dourish (2009) renvoient à différentes raisons de ne pas utiliser. *L'adoption tardive* est la première. Elle renvoie à la théorie de la diffusion des innovations de Rogers (1962, 1995), que nous avons présentée plus tôt dans ce chapitre. Elle considère donc que les non-utilisateurs sont de futurs utilisateurs. La seconde forme de non-usage est la *résistance*, telle qu'elle peut être présentée dans les travaux de Laumer et Eckhardt (2012) présentés précédemment. Le *désenchantement* est la troisième forme de non-usage présentée par les auteurs, elle renvoie aux personnes qui choisissent de ne pas utiliser par nostalgie de la période où la technologie n'était pas utilisée, et qui considèrent que les technologies peuvent être inauthentiques. On parle également de *dépossession* comme d'une forme de non-usage, où certaines personnes n'utilisent pas une technologie, car ils ne peuvent pas y accéder pour des raisons cognitives, physiques, ou encore socio-économiques. La cinquième forme de non-usage décrite par les auteurs est le *déplacement* : elle renvoie aux situations où une personne n'utilise pas elle-même une technologie, mais y a accès grâce à un intermédiaire. Dans ces situations de non-usage, les non-utilisateurs tirent les mêmes bénéfices que les utilisateurs, sans toutefois utiliser. Enfin, la dernière forme de non-usage décrite est le *manque d'intérêt*. Elle renvoie aux situations où des individus n'utilisent pas une technologie parce qu'elle ne les intéresse pas. Les auteurs pointent les situations où l'étude d'une technologie répond à un enjeu de recherche sans présenter d'intérêt pour les individus.

SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3

L'objectif de ce chapitre était de faire une synthèse des théories sur l'acceptabilité des technologies. Nous avons ouvert ce chapitre sur des éclaircissements terminologiques autour de l'acceptabilité et ses notions voisines. Nous avons **défini** :

- **l'acceptabilité** comme la première phase du processus d'acceptation des technologies, elle renvoie aux représentations des utilisateurs sur une technologie future ;
- **l'acceptation** comme la seconde phase du processus, qui renvoie aux premières utilisations de la technologie (Terrade et al., 2009) et, de manière plus large, à l'expérience réelle des utilisateurs avec la technologie (Bobillier Chaumon & Dubois, 2009) ;
- **l'appropriation** comme le moment où la technologie est intégrée dans les activités de l'individu et on l'on peut observer des détournements d'usage et des phénomènes de contentement ;
- **l'adoption** comme la décision d'adopter une technologie ;
- **l'intention** d'usage comme la motivation d'utiliser une technologie sans certitude sur son utilisation future.

L'étude de l'acceptabilité d'une technologie vise à déterminer les raisons de son rejet ou de son adoption, ainsi qu'à prédire son utilisation. Nous avons présenté **trois approches théoriques** de l'acceptabilité.

La première, **l'acceptabilité pratique**, cherche à assurer une interaction optimale entre l'utilisateur et la technologie.

Le modèle d'acceptabilité de Nielsen (1993) nous a permis de présenter les dimensions instrumentales traitées par cette approche ; il s'agit principalement de l'utilisabilité, et de l'utilité dans une moindre mesure. Nous avons également évoqué des dimensions non-instrumentales qui peuvent permettre d'assurer l'acceptabilité pratique d'une technologie. Pour ce faire, nous avons évoqué les modèles de l'expérience utilisateur, mais également des dimensions plus restreintes comme les émotions ou le plaisir.

L'acceptabilité sociale est la seconde approche que nous avons décrite. Elle se donne pour objectif de prédire l'usage d'une technologie. Deux types de modèles ont été recensés : les modèles basés sur la satisfaction des utilisateurs (modèles du succès de la technologie, modèle de la disconfirmation des attentes) et les modèles basés sur les perceptions des individus (TAM, UTAUT).

La troisième approche décrite dans ce chapitre est **l'acceptation située** (Bobillier Chaumon, 2013, 2016). Elle étudie les apports et les limites d'une technologie dans son contexte d'usage, ainsi que son intérêt par rapport à l'activité et aux projets de l'individu. Deux paradigmes sont mobilisés par cette théorie : d'une part, les théories de l'activité et de l'action ; et, d'autre part, la théorie de l'appropriation.

Nous avons clos ce chapitre sur les notions de **résistance**, de **rejet** et de **non-usage**, qui ont été moins traitées par la littérature scientifique, comparativement à l'acceptabilité. La **résistance** est définie comme une action ou une inaction délibérée avec laquelle un individu s'oppose à ou évite l'implantation d'une technologie. La résistance s'exprime par des comportements de rejet ou de non-adoption. Le **rejet** est la décision délibérée de l'utilisateur d'éviter un système alors qu'à l'inverse, dans la **non-adoption** l'individu n'utilise pas un système, mais s'autorise une future adoption.

Les deux premiers chapitres de cet état de l'art se sont centrés sur la réalité virtuelle et sur l'interaction des utilisateurs avec cette technologie. Dans ce chapitre, nous nous sommes arrêtée sur l'acceptabilité des technologies, en présentant différentes approches et différents modèles qui traitent de cette question. Notre prochain chapitre combinera ces deux thématiques : il s'agira de faire un bilan des études empiriques sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle.

CHAPITRE 4. L'ACCEPTABILITÉ DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Afin d'identifier les variables à prendre en compte dans l'étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle ainsi que les méthodes utilisées, nous avons conduit une revue de la littérature sur les études empiriques incluant une évaluation de l'acceptabilité d'une expérience en réalité virtuelle ou d'un environnement virtuel (Sagnier, Loup-Escande, & Valléry, sous presse). En effet, nous pensons que certaines caractéristiques propres aux technologies immersives – telles que la présence ou le mal des environnements virtuels – peuvent avoir un effet sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle en complément de variables plus traditionnelles comme l'utilité perçue ou la facilité d'utilisation perçue.

Pour répondre à cet objectif, nous avons entré les mots clés « virtual environment » OU « virtual reality » associés à « acceptance » ou « acceptability » sur PsycINFO, ScienceDirect et Google Scholar. Afin de traiter de technologies semblables à celles que l'on peut trouver aujourd'hui (et qui sont utilisées dans nos études), nous avons décidé de n'inclure que les études de la dernière décennie ; notre revue de la littérature concerne donc les études empiriques publiées entre 2007 et 2019.

1. LES PRINCIPAUX DOMAINES D'APPLICATION DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET LES PRINCIPAUX OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION DE SON ACCEPTABILITÉ

Les études qui incluent une évaluation de l'acceptabilité de la réalité virtuelle et des environnements virtuels s'inscrivent dans différents domaines, qui s'apparentent aux domaines d'application de la réalité virtuelle que nous relevions précédemment dans cet état de l'art (voir partie Chapitre 1.4. . Les principales applications de la réalité virtuelle). En effet, on retrouve des études qui évaluent l'acceptabilité de ce type de technologies dans l'éducation, dans la formation professionnelle, dans le loisir, dans la thérapie, dans le tourisme et dans le commerce. Toutefois, nous notons avec surprise l'absence d'évaluations de l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans des activités de conception, bien que cette application compte parmi les plus courantes (Burkhardt, 2003).

Parmi les études qui évaluent l'acceptabilité de la réalité virtuelle et des environnements virtuels, on trouve en premier lieu des applications de ces technologies en tant qu'outils thérapeutiques. Dans ce type d'applications, les évaluations portent sur deux aspects : les perceptions des utilisateurs à l'égard de ces technologies et l'efficacité de ces technologies. Parmi ces études, celle de Knowles, Stelzer, Jovel, et O'Connor (2017) présente un environnement virtuel visant à former des groupes de soutien pour des personnes en deuil. Les auteurs cherchent à vérifier l'efficacité thérapeutique de cet environnement virtuel en relevant à trois temps de la thérapie des indicateurs tels que des mesures de l'intensité du deuil, de la dépression ou encore du stress perçu. Les auteurs évaluent également les perceptions des utilisateurs sur le degré d'immersion ressenti, leur sentiment d'être soutenu par le groupe et la probabilité avec laquelle ils recommanderaient cet environnement virtuel à d'autres personnes. Ce type d'évaluations, sur les perceptions de la qualité de la technologie et sur les intentions de la recommander ou de l'utiliser à nouveau, se retrouve dans d'autres études. Par exemple, Wong Sarver, Beidel, et Spitalnick (2014) proposent un environnement virtuel pour le traitement de l'anxiété sociale chez les adolescents. Les évaluations comprennent dans un premier lieu les perceptions des utilisateurs sur la qualité générale de l'environnement virtuel ainsi que sur son

utilisabilité et son réalisme. Dans un second temps, les auteurs interrogent l'intention des adolescents d'utiliser de nouveau cette technologie et de la recommander à d'autres. Il est également à noter que l'étude de Bertrand et Bouchard (2008) sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle par des psychologues cliniciens qui y sont favorables s'inscrit également dans le champ des applications de la réalité virtuelle en tant qu'outil thérapeutique. Toutefois, quelques différences sont à relever avec les études majoritairement que nous avons répertoriées en thérapie : l'étude en question s'intéresse à l'implantation de la réalité virtuelle de manière générale, elle s'intéresse aux perceptions des cliniciens et non des patients, et elle s'appuie explicitement sur un modèle d'acceptabilité des technologies (le TAM).

L'évaluation de l'acceptabilité de la réalité virtuelle est également courante dans le domaine de l'éducation. Les études dans ce domaine portent sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle (e.g., Lin & Yeh, 2019; Makransky & Lilleholt, 2018) et des environnements virtuels (e.g., Cheng, 2014; Huang & Liaw, 2018; Huang, Hood, & Yoo, 2013; Shin, Biocca, & Choo, 2013; Tokel & Isler, 2013) majoritairement par les élèves ou les étudiants. Les applications étudiées sont variées. Il s'agit par exemple de faire demander à des étudiants en conception industrielle d'importer un modèle 3D et de le visualiser et le manipuler par le biais d'un visio-casque (Hamurcu, 2018), ou encore de proposer à des étudiants une plateforme où un enseignant donne ses cours en 3D afin qu'ils puissent revoir leurs cours ou y assister à distance (Shin et al., 2013). Les auteurs de ces études évaluent majoritairement les perceptions des utilisateurs sur la facilité d'utilisation de la technologie (e.g., Shin et al., 2013), son utilité (e.g., Huang & Liaw, 2018) et le plaisir qui accompagne l'utilisation (e.g., Tokel & Isler, 2013). Ils interrogent également les intentions d'usage de ces technologies et la probabilité que les participants des études les recommandent à d'autres personnes. Parfois, les évaluations prennent en compte des variables spécifiques aux situations d'apprentissage telles que la motivation (e.g., Huang & Liaw, 2018; Makransky & Lilleholt, 2018) ou encore l'apprentissage perçu (e.g., Makransky & Lilleholt, 2018). Certaines études s'intéressent également aux perceptions des enseignants sur la réalité virtuelle et les environnements virtuels. Herrero et al. (2015) ont par exemple conduit une étude sur l'acceptabilité des technologies par des enseignants à l'université. Dans cette étude, différents types d'environnements virtuels étaient évalués : des jeux d'aventure, des jeux multi-joueurs en ligne et des serious games.

Par ailleurs, la réalité virtuelle est implantée dans des situations de formation professionnelle. Les applications évaluées concernent la formation à des procédures d'intubation pour des étudiants infirmiers (Chow et al., 2012), au soudage d'un châssis de camion en industrie (Ordaz et al., 2015) ou encore à l'enseignement de la chirurgie en utilisant un simulateur avec retours haptiques (Fang et al., 2014). L'évaluation de ce type d'applications porte principalement sur les perceptions des utilisateurs, notamment en termes d'utilité perçue et de facilité d'utilisation perçue (Chow et al., 2012; Fang et al., 2014), mais également sur l'efficacité de la technologie (Ordaz et al., 2015).

L'acceptabilité des environnements virtuels et des expériences en réalité virtuelle est également évaluée pour des applications à visée hédonique. On s'intéresse par exemple aux perceptions des personnes âgées sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour le loisir (Lin, Jeng, & Yeh, 2018) ou encore à l'acceptabilité de mondes virtuels de manière générale (Fetscherin & Lattemann, 2008).

Par ailleurs, on relève l'évaluation de l'acceptabilité de la réalité virtuelle à des fins commerciales. Par exemple, l'étude de Kim et Forsythe (2008) traite des perceptions des utilisateurs sur un environnement virtuel permettant d'essayer des vêtements. D'autres études traitent de l'acceptabilité de la réalité virtuelle de manière plus générale, notamment à l'intention de continuer à utiliser la réalité virtuelle grand public (Hou, Kang, & Moon, 2019) ou à acheter du matériel de réalité virtuelle (Manis & Choi, 2019).

Enfin, l'acceptabilité de la réalité virtuelle est également évaluée dans le tourisme. Par exemple, l'étude de Huang, Backman, Backman, et Moore (2013) présente un environnement virtuel qui représente la réserve nationale du Masai Mara. Ils étudient les perceptions des utilisateurs sur la technologie, notamment concernant la facilité d'utilisation perçue, l'utilité perçue ou le plaisir perçu, mais également les intentions des utilisateurs de visiter la destination.

2. LES DISPOSITIFS ÉVALUÉS

Les études relevées concernent plus majoritairement les environnements virtuels 3D temps réel que la réalité virtuelle immersive. On relève notamment une majorité d'études portant sur un monde virtuel particulier : Second Life (e.g., Chow et al., 2012; Huang, Backman, Backman, McGuire, & Moore, 2018; Tokel & Ísler, 2013). Ce monde virtuel présente l'avantage de pouvoir être facilement adapté aux objectifs des études. Il a ainsi permis de développer un environnement virtuel pour la formation à une procédure d'intubation (Chow et al., 2012) ou de proposer d'explorer une réserve nationale en y faisant une chasse au trésor (Huang et al., 2018).

D'autres études portent sur certains dispositifs de réalité virtuelle : par exemple, sur un dispositif de locomotion (Skopp, Smolenski, Metzger-Abamukong, Rizzo, & Reger, 2014) ou sur un dispositif d'entrée par webcam (Sun & Cheng, 2009). D'autres encore traitent de l'acceptabilité de la réalité virtuelle de manière générale (e.g., Hou et al., 2019; Manis & Choi, 2019).

3. LES MODÈLES MOBILISÉS ET LES DIMENSIONS CONSIDÉRÉES

Nous regroupons les études en deux catégories : d'une part, celles qui mobilisent un modèle existant de l'acceptabilité des technologies ; d'autre part, celles qui évaluent l'acceptabilité sans mobiliser ce type de modèles. Nous commencerons par présenter le premier type d'études, en indiquant les principaux modèles mobilisés ainsi que les résultats obtenus. Les études de la seconde catégorie ne s'appuient pas sur les mêmes conceptions de l'acceptabilité des technologies ; nous ne serons donc pas en mesure de lier les différentes dimensions évaluées entre elles. Toutefois, nous en proposerons une synthèse de ces dimensions en différentes catégories qui semblent pertinentes pour l'évaluation de l'acceptabilité de la réalité virtuelle.

3.1. Les modèles d'acceptabilité des technologies mobilisés et leurs dimensions intrinsèques

Le principal modèle mobilisé par les études s'intéressant à l'acceptabilité de la réalité virtuelle est le TAM. Ce constat n'est pas surprenant puisque ce modèle est aujourd'hui le plus utilisé dans les études empiriques traitant de l'acceptabilité des technologies (Hsiao & Yang, 2011; Venkatesh, 2000). Nous relevons deux types d'utilisation du TAM : soit les auteurs utilisent des versions étendues de ce modèle,

c'est-à-dire qu'ils ajoutent des dimensions supplémentaires au modèle initial, soit ils combinent ce modèle à d'autres.

Les modèles d'acceptabilité proposés comprennent différents types de variables. En premier lieu, on trouve évidemment les variables du TAM original, c'est-à-dire l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et les intentions d'usage. Les études confirment à nouveau les liens entre les variables que pose le TAM. Ainsi, dans les études relevées, les intentions d'usage sont prédites par l'utilité perçue (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Huang, Backman, Backman, & Chang, 2016; Tokel & Ísler, 2013) et la facilité d'utilisation perçue (Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Ísler, 2013). Les études confirment également le lien indirect de la facilité d'utilisation perçue sur les intentions d'usage, en mettant en évidence son influence sur l'utilité perçue (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Kim & Forsythe, 2008; Manis & Choi, 2018; Tokel & Ísler, 2013). Par ailleurs, certaines études incluent également les attitudes. Elles sont influencées par l'utilité perçue (Kim & Forsythe, 2008; Sun & Cheng, 2009) ou l'influencent (Fetscherin & Lattemann, 2008). Elles ont également un effet significatif sur les intentions d'usage (Kim & Forsythe, 2008; Manis & Choi, 2018) et sur l'usage lui-même (Sun & Cheng, 2009). Il est à noter qu'une étude montre que les attitudes des utilisateurs envers l'achat de matériel de réalité virtuelle ont des effets sur l'intention d'achat (Manis & Choi, 2019).

Des dimensions non-instrumentales viennent également compléter les modèles proposés. En effet, une grande partie des études se sont intéressées à l'influence du plaisir dans l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Les résultats montrent qu'il influence la facilité d'utilisation perçue (Bertrand & Bouchard, 2008; Tokel & Ísler, 2013; Yeh & Lin, 2019), l'utilité perçue (Manis & Choi, 2019; Tokel & Ísler, 2013; Yeh & Lin, 2019) et les attitudes envers l'usage (Kim & Forsythe, 2008; Manis & Choi, 2019; Sun & Cheng, 2009). Par ailleurs, une étude montre que le plaisir perçu a un effet sur les attitudes envers l'achat de matériel de réalité virtuelle et envers l'intention d'achat (Manis & Choi, 2019). Ces résultats sont toutefois à nuancer, car d'autres études ne lui trouvent pas d'effet significatif ni sur la facilité d'utilisation perçue (Sun & Cheng, 2009), ni sur l'utilité perçue (Sun & Cheng, 2009) ni sur les intentions d'usage (Huang et al., 2016). D'autres variables hédoniques ont également intéressé les auteurs. Une étude a par exemple intégré les émotions positives des utilisateurs ainsi que leur engagement émotionnel. Les résultats montrent que ces deux variables ont un effet significatif sur les intentions d'usage (Huang et al., 2016). Le flow a également été étudié : les études montrent qu'il a un effet sur les intentions d'usage (Huang et al., 2016) ainsi que sur l'immersion, la présence et la confirmation des attentes des utilisateurs (Shin et al., 2013).

Une autre catégorie de variables ajoutées au TAM concerne les caractéristiques des utilisateurs. On s'intéresse notamment au rapport des individus avec les technologies. Par exemple, certaines études ont évalué les effets du sentiment d'efficacité des individus. Le sentiment d'efficacité en informatique a un effet sur la facilité d'utilisation et l'utilité perçue (Chow et al., 2012). De la même manière, le sentiment de contrôle vis-à-vis de l'utilisation d'un ordinateur influence également la facilité d'utilisation perçue. Le sentiment d'efficacité à la tâche a un effet sur l'évolution des intentions d'usage, mais pas sur les intentions d'usage initiales (Luse, Mennecke, & Triplett, 2012). Il a également été montré que le sentiment de contrôle avait un effet sur la facilité d'utilisation perçue (Bertrand & Bouchard, 2008). D'autres études se sont intéressées à l'anxiété des personnes face aux technologies. Les effets

mis en évidence varient. En effet, certaines études trouvent un effet modérateur de cette variable sur le lien attitudes – intentions d’usage ou un effet direct sur la facilité d’utilisation perçue (Bertrand & Bouchard, 2008), alors que d’autres lui trouvent un effet non significatif sur les intentions d’usage (Kim & Forsythe, 2008) et sur l’utilité perçue (Fetscherin & Lattemann, 2008). L’intérêt des individus pour les technologies est également étudié : une étude montre par exemple un effet de la curiosité sur la facilité d’utilisation perçue (Manis & Choi, 2019) et une autre un effet modérateur de la technophilie sur le lien attitudes envers l’usage – intentions d’usage (Kim & Forsythe, 2008). Par ailleurs, les études montrent un effet de l’expérience antérieure avec la technologie sur l’intention d’usage (Manis & Choi, 2018; Shin et al., 2013) et sur la facilité d’utilisation perçue (Manis & Choi, 2019). Toutefois le rôle de cette variable est à nuancer : l’effet direct sur l’intention d’usage n’est pas toujours retrouvé (Shin, Biocca, & Choo, 2013) et une étude ne lui trouve pas d’effet significatif sur l’utilité perçue (Manis & Choi, 2019). Enfin, une étude montre un effet significatif de l’âge des individus sur la facilité d’utilisation perçue et un effet non significatif sur l’utilité perçue (Manis & Choi, 2019).

Puisque les extensions du TAM proposées visent à mieux adapter ce modèle à la réalité virtuelle, certains auteurs intègrent des caractéristiques spécifiques aux technologies immersives. Par exemple, Shin et al. (2013) montre des effets de la présence sur la confirmation des attentes, l’immersion et le flow (Shin et al., 2013). Une autre étude montre également une influence de la présence sur l’utilité perçue et la facilité d’utilisation perçue (Hou et al., 2019). Par ailleurs, les résultats obtenus par Sun et Cheng (2009) mettent en évidence un effet de l’interface sur la facilité d’utilisation perçue, mais pas d’effet sur l’utilité perçue et les attitudes. Tcha-Tokey et al. (2018) ont par ailleurs montré des effets négatifs du mal des environnements virtuels sur l’intention d’usage de la réalité virtuelle.

Enfin, plus rarement, certains auteurs se sont intéressés à l’influence sociale, c’est-à-dire au degré avec lequel un individu croit que les personnes qui sont importantes pour elle veulent (ou ne veulent pas) qu’elle utilise un système (Venkatesh et al., 2003). Les résultats obtenus suggèrent que cette variable a un effet sur l’utilité perçue (Fetscherin & Lattemann, 2008) et sur les intentions d’usage (Luse et al., 2012).

3.2. Les dimensions considérées dans les évaluations de l’acceptabilité sans mobilisation de modèle spécifique

La deuxième catégorie d’études que nous avons relevées ne s’appuie pas sur un modèle spécifique de l’acceptabilité. Dans ces études, l’acceptabilité d’une technologie ne repose pas sur les intentions d’usage, mais sur d’autres dimensions qui renvoient à des conceptions différentes de ce qu’est l’acceptabilité.

Parmi les dimensions évaluées, on retrouve tout de même l’utilité perçue et la facilité d’utilisation, qui sont les dimensions centrales pour l’acceptabilité pratique, mais également pour les modèles d’acceptabilité sociale. L’utilité perçue est évaluée par le biais de questionnaires pour lesquels les utilisateurs doivent exprimer dans quelle mesure le dispositif leur semble utile soit pour un aspect donné, par exemple pour l’apprentissage d’une tâche (Ordaz et al., 2015) ou de manière générale (García-Palacios et al., 2014 ; Herrero et al., 2015 ; Herrero, García-Palacios, Castilla, Molinari, & Botella, 2014). Les échelles de mesure utilisées sont proches de celles utilisées dans les études sur l’acceptabilité sociale des technologies ; une étude

(Johnson et al., 2014), n'affirmant pas utiliser explicitement le TAM, s'appuie d'ailleurs sur les échelles d'utilité perçue et de facilité d'utilisation perçue développées par Davis (1989). Nous relevons également des recherches qui intègrent des évaluations de l'utilité objective des technologies, par comparaison à l'utilité subjective évaluée dans les autres études par le biais d'échelles de mesure. Elles évaluent par exemple la performance des utilisateurs (Arguelaguet et al., 2011) ou encore l'efficacité du dispositif en termes de temps de réalisation de la tâche et de nombre d'erreurs commises (Ordaz et al., 2015). Les évaluations de la facilité d'utilisation reposent également sur des échelles de mesure (Herrero et al., 2015 ; Johnson et al., 2014 ; Wong Sarver et al., 2014). En plus de ces deux dimensions, une étude intègre la qualité perçue d'un environnement virtuel en récoltant les perceptions des utilisateurs sur la qualité des sons et des images, ainsi que sur la compréhension des réponses par le programme (Johnson et al., 2014).

Il est à noter qu'une seule étude adopte une approche davantage qualitative. Elle consiste en des observations et un débriefing en groupe pour évaluer l'acceptabilité d'un environnement virtuel visant la réhabilitation de détenus provenant de services psychiatriques (Hodge et al., 2015). Cette étude évalue l'utilité perçue de l'environnement virtuel, en se demandant dans quelle mesure il répondait aux attentes des utilisateurs. Par ailleurs, elle évalue sa facilité d'utilisation perçue, son réalisme ou encore l'engagement des utilisateurs lors de l'utilisation.

Nous notons que certaines recherches intègrent des dimensions spécifiques à la réalité virtuelle, notamment la présence (Benoit et al., 2015 ; Fornells-Ambrojo et al., 2008 ; Skopp et al., 2014), l'immersion (Knowles et al., 2017 ; Newbutt et al., 2016), le mal des simulateurs (Benoit et al., 2015 ; Fornells-Ambrojo et al., 2008 ; Skopp et al., 2014), le réalisme (Hodge et al., 2015 ; Wong Sarver et al., 2014) et la fidélité (Ordaz et al., 2015). Des dimensions spécifiques aux environnements virtuels évalués sont également prises en compte, comme le sentiment de soutien social (Knowles et al., 2017) ou le sentiment de co-présence (Johnson et al., 2016).

Par ailleurs, certaines dimensions liées à l'expérience utilisateur sont prises en compte. Certaines renvoient à une expérience positive avec la technologie, notamment le plaisir de l'utilisateur (Newbutt et al., 2016 ; Wong Sarver et al., 2014), son confort (Ordaz et al., 2015), son engagement (Hodge et al., 2015) ou encore sa motivation (Benoit et al., 2015), alors que d'autres renvoient à une expérience négative, comme l'aversion de l'utilisateur envers la technologie (Rus-Calafell et al., 2013 ; Rus-Calafell, Gutiérrez-Maldonado, & Ribas-Sabaté, 2014), son anxiété (Benoit et al., 2015), son sentiment de sécurité (Benoit et al., 2015), sa fatigue (Benoit et al., 2015) ou encore son agacement (Herrero et al., 2014).

Certaines des études qui ne mobilisent pas de modèles de l'acceptabilité des technologies spécifiques intègrent les intentions d'usage (Herrero et al., 2015 ; Newbutt et al., 2016 ; Wong Sarver et al., 2014). Toutefois, la majorité des études utilisent des indicateurs différents de l'acceptabilité. Il peut s'agir du consentement à porter un visio-casque et à participer à l'étude pour des personnes autistes (Newbutt et al., 2016), la potentielle recommandation de la technologie à d'autres personnes (Herrero et al., 2015 ; Herrero et al., 2014 ; Knowles et al., 2017 ; Wong Sarver et al., 2014) ou, de manière générale, la satisfaction des utilisateurs (Garcia-Palacios et al., 2014 ; Skopp et al., 2014). Une étude prend également en compte l'usage effectif d'un environnement, en relevant le nombre et la durée des connexions des utilisateurs (Johnson et al., 2014).

Les études de cette catégorie ne cherchent pas de liens statistiques entre les différentes variables évaluées. Ce sont ces variables qui servent d'indicateurs à l'acceptabilité de la réalité virtuelle, alors que les études qui mobilisent des modèles cherchent à expliquer les intentions d'usage des technologies. Ce sont les moyennes obtenues pour les différents indicateurs évalués sur des échelles de mesure qui permettent aux auteurs de conclure sur le degré d'acceptabilité de la technologie aux yeux des utilisateurs.

4. L'ACCEPTABILITÉ DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS L'INDUSTRIE

Comme nous le soulignons plus tôt, peu d'études se sont explicitement intéressées à l'acceptabilité de la réalité dans l'industrie, bien que ce domaine fasse partie des plus courants (Burkhardt, 2003). Nous relevons des études qui traitent de cette question, mais qui n'en font pas leur principale question de recherche. Par ailleurs, les études que nous présentons lorsque nous décrivons les principales applications de la réalité virtuelle dans l'industrie illustrent des cas d'usage, sans toutefois donner d'éléments ni sur les usages réels et situés des applications développées, ni sur les perceptions des utilisateurs à l'égard de ces applications.

L'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie est pourtant considérée comme une question critique. La recherche qui est, à notre connaissance, la plus poussée sur question est celle de Benes (2013) dans sa thèse de doctorat. Il met en évidence un manque d'acceptation de la réalité virtuelle par les concepteurs de produits en industrie. Il identifie différents freins à l'acceptation de la réalité virtuelle dans ce contexte : des doutes concernant ses apports, son manque de précision, ses dispositifs d'interaction qui sont considérés comme invasifs et longs à mettre en place, des problèmes d'utilisabilité, un temps de développement long et un manque de points de repère par rapport aux logiciels couramment utilisés. En revanche, les utilisateurs pointent l'intérêt de la réalité virtuelle pour comprendre le produit conçu, gagner du temps sur la conception, détecter des potentiels problèmes et prendre des décisions. De la même manière, Moser, Hohlagschwandtner, Kormann-Hainzl, Pözlbauer, et Wolfartsberger (2019) considèrent que le degré d'acceptation des technologies de réalité mixte (qui combine réalité virtuelle et réalité augmentée) est faible et qu'elles ne sont pas assez robustes pour supporter les activités quotidiennes en industrie.

Nous notons tout de même un intérêt des chercheurs pour l'utilisation de la réalité virtuelle dans les revues de projet pour la conception de produits ou de postes. Toutefois, ces études intègrent rarement des situations réelles de conception : elles se centrent sur l'intégration de données issues la CAO à des environnements virtuels immersifs (e.g., I. J. Freeman, Salmon, & Coburn, 2016), ou elles décrivent de manière large des avantages et des limites de la réalité virtuelle pour les revues de projet, sans s'appuyer sur des études en conditions réelles (e.g., Grajewski et al., 2013).

Trois études sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans le cadre de revues de projet ont quand bien même retenu notre attention, car il s'agit d'études en situation réelle. La première est une étude de Berg et Vance (2017a), qui concerne la conception d'une pompe hydraulique. Les auteurs cherchaient à comprendre comment la réalité virtuelle pouvait influencer la prise de décision des concepteurs. Pour ce faire, ils ont étudié le processus de conception d'une équipe de cinq ingénieurs ; ils les ont observés utiliser un CAVE lors de trois sessions en réalité virtuelle et ils ont conduit des entretiens collectifs à l'issue de chacune de ces sessions. Les résultats obtenus dans cette étude informent sur les perceptions des

utilisateurs sur l'intégration de la réalité virtuelle dans le projet. Ils s'expriment notamment sur les bénéfices de la réalité virtuelle : la visualisation d'un produit à l'échelle 1, une meilleure compréhension de l'organisation spatiale des différents éléments de la pièce, mais également un meilleur engagement des participants lors des sessions comparativement aux réunions traditionnelles autour d'une table. Les utilisateurs s'expriment surtout sur les bénéfices de la réalité virtuelle pour la prise de décisions de conception lors et suite aux sessions.

La seconde étude sur laquelle nous souhaitons nous arrêter porte sur la réalité virtuelle dans le domaine de la construction (Y. Liu et al., 2014). Les auteurs ont évalué l'utilisation de la réalité virtuelle (un mur de projection) dans le cadre d'une revue de projet. Des entretiens ont été conduits avec les concepteurs suite aux revues de projet en réalité virtuelle. Les utilisateurs rapportent des bénéfices à la réalité virtuelle : une meilleure compréhension des distances et des volumes, un engagement plus fort des participants et l'identification de problèmes non relevés avec des méthodes traditionnelles (croquis, plans). Les auteurs relèvent également des limites de la réalité virtuelle pour les utilisateurs. Ils expliquent que le manque d'informations sur cette technologie et sur ses usages pourrait avoir freiné son utilisation. Ils pointent également que l'intégration de la réalité virtuelle à un projet demande une coordination importante des membres de l'équipe de conception pour que la session soit co-localisée : il faut réunir l'ensemble des acteurs dans le même lieu. Enfin, ils relèvent que la préparation des revues de projet est plus importante qu'avec des outils traditionnels, car elle requiert des temps de développement de l'environnement virtuel.

La troisième étude conduite en situation réelle que nous aimerions présenter est celle de Wolfartsberger (2019). Elle porte sur l'évaluation de l'application VRSmart, qui permet de visualiser des données issues d'une CAO. Dans une entreprise concevant des groupes électrogènes pour l'industrie, l'auteur a comparé expérimentalement un logiciel de CAO (celui habituellement utilisé par l'entreprise) à l'application en réalité virtuelle. Pour cela, il a demandé à 16 salariés de l'entreprise qui participent fréquemment à des revues de projet (production, ingénierie, achats), d'évaluer collectivement en CAO et en réalité virtuelle deux groupes électrogènes provenant de projets antérieurs. Les résultats de cette étude montrent que les participants identifient des problèmes de conception avec les deux technologies, avec un léger avantage relevé de la réalité virtuelle sur le logiciel CAO, sans préciser si cette différence est significative. Les perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle sont majoritairement positives : ils la jugent facile d'utilisation, utile dans la revue de projet et pour identifier des problèmes de conception. En revanche, les participants à l'étude soulignent également des gênes dans l'interaction avec la réalité virtuelle : la personne qui porte le casque se sent isolée de ses collègues et il était difficile pour les utilisateurs passifs de voir certains éléments précis des maquettes à cause des mouvements de tête de l'utilisateur portant le casque.

Enfin, certaines études conduites en industrie se centrent davantage sur l'acceptabilité pratique de la réalité virtuelle. Gorecky, Khamis, et Mura (2015) ont ainsi développé une application en réalité virtuelle pour la formation dans l'industrie aéronautique. Ils évaluent l'acceptabilité du dispositif à partir de son degré d'immersion, et en concluent à un bon degré d'acceptabilité de la technologie.

Force est de constater que peu d'études ont été menées en situations réelles de conception dans l'industrie. Les études sur lesquelles nous nous sommes arrêtée

identifient toutefois certaines des perceptions des utilisateurs sur l'utilité de la réalité virtuelle dans des revues de projet.

5. APPORTS ET LIMITES DES ÉTUDES ANTÉRIEURES CONDUITES SUR L'ACCEPTABILITÉ DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Pour conclure cette revue des études empiriques sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle, nous résumerons leurs principaux apports et leurs limites. Ces études, puisqu'elles s'inscrivent majoritairement dans l'acceptabilité sociale, donnent des indications sur les variables à prendre en compte pour prédire les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Elles montrent la pertinence de l'utilisation du TAM dans cet objectif. Elles intègrent également certaines caractéristiques des utilisateurs (par exemple, sentiment d'efficacité, technophilie), ainsi que des dimensions hédoniques (par exemple, plaisir perçu, flow) et des dimensions spécifiques aux technologies immersives (par exemple, présence, mal des environnements virtuels). Elles complètent de cette façon le modèle initial, qui est lui centré sur des dimensions instrumentales et traditionnelles : l'utilité et la facilité d'utilisation perçue. Ces études nous ont ainsi permis d'établir, parmi l'ensemble des dimensions prises en compte, celles dont les effets sont significatifs sur d'autres variables et de déterminer quelles peuvent être les relations entre les différentes variables.

Toutefois, certaines limites de ces études sont à relever. Les critiques que nous formulons de manière plus générale pour les études qui s'inscrivent dans l'acceptabilité sociale s'appliquent également aux études relevées. La première limite de ces études concerne le choix de la population. Il s'agit majoritairement d'étudiants, qui sont rarement les utilisateurs finaux des technologies évaluées. Il nous paraît donc critiquable de généraliser leurs perceptions à des utilisateurs finaux qui présentent des caractéristiques très différentes en termes d'âge, d'expériences avec les technologies et d'attrait envers elle, de connaissances antérieures sur un domaine, etc. Par ailleurs, puisque ces études ont souvent lieu dans des conditions expérimentales, les résultats recueillis ne prennent pas en compte les contextes d'usage réels, les activités réellement réalisées et leurs enjeux qui ont nécessairement un effet sur l'acceptation des technologies. De plus, les résultats sont majoritairement recueillis par questionnaires, ce qui permet aux chercheurs d'obtenir des scores et de tester des liens statistiques entre les variables, mais les empêche de comprendre les raisons derrière les perceptions des personnes interrogées. De la même façon, l'usage effectif est rarement étudié. Ces études sont centrées sur les perceptions des utilisateurs et n'intègrent pas la manière dont elles peuvent être influencées par l'usage et inversement. Enfin, l'évolution temporelle est absente de ces études, qui recueillent les perceptions sur une technologie à un instant t , sans prendre en compte les évolutions possibles des perceptions avec l'usage ainsi que la manière dont les individus peuvent se les approprier.

SYNTHÈSE DU CHAPITRE 4

L'objectif de ce chapitre était de faire un **bilan des études empiriques traitant de l'acceptabilité de la réalité virtuelle**. Nous avons identifié deux catégories d'études : d'une part, les études qui mobilisent des **modèles d'acceptabilité sociale** (très majoritairement le TAM), et, d'autre part, les études qui ne s'appuient **pas explicitement sur un modèle d'acceptabilité** des technologies existant.

La **première catégorie d'études**, qui mobilisent donc des modèles d'acceptabilité sociale, montrent un intérêt des **variables centrales du TAM** (utilité perçue et facilité d'utilisation perçue) pour expliquer les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Par ailleurs, nous relevons que d'autres variables complètent les modèles : des **variables non-instrumentales** (plaisir et émotions positives), des variables relatives aux **caractéristiques des utilisateurs** (technophilie, sentiment d'efficacité en informatique, curiosité), et des **variables spécifiques à l'interaction avec la réalité virtuelle** (présence). Ces différentes variables ont des effets soit directement sur les intentions d'usage, soit indirectement par le biais d'autres dimensions.

À la différence de la première catégorie d'études, la **seconde catégorie** n'envisage pas nécessairement l'acceptabilité en termes d'intention d'usage, mais **à travers d'autres variables**. Les études de cette catégorie se fondent sur des **conceptions très différentes de l'acceptabilité**. Ainsi, certaines se limitent à des variables diverses qui servent **d'indicateurs à l'acceptabilité**, tels que la satisfaction, le plaisir ou encore le manque d'agacement ou la non-aversion envers la technologie.

Dans ce chapitre, nous nous sommes également arrêtée sur les évaluations de **l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie**, et plus particulièrement, en ce qui concerne la conception de produits et de postes, puisque c'est sur ce cas d'usage que portera la majorité des études conduites dans ce travail de recherche. Manifestement, peu d'études se sont intéressées à cette question – ou néanmoins, pas explicitement. Nous relevons tout de même des études en situation réelle de conception pour lesquelles les utilisateurs pointent l'utilité de la réalité virtuelle, notamment pour comprendre le produit conçu et détecter des problèmes de conception (Bennes, 2013 ; Berg & Vance, 2017a ; Liu et al., 2014 ; Wolfartsberger, 2019).

CONCLUSION DE L'ÉTAT DE L'ART

Cet état de l'art nous a permis de présenter les différents éléments qui ont guidé notre travail de recherche. D'abord, nous avons brièvement présenté la réalité virtuelle et nous avons expliqué les dimensions prises en compte en ergonomie dans sa conception et dans son évaluation. Puis, nous avons consacré un chapitre à l'acceptabilité des technologies. Nous avons présenté trois approches de l'acceptabilité : l'acceptabilité pratique, l'acceptabilité sociale et l'acceptation située. Nous avons décrit leurs objectifs, les méthodes qu'elles mobilisent, ainsi que leurs apports et leurs limites. Dans le dernier chapitre de cet état de l'art, nous nous sommes arrêtée sur les études empiriques qui traitent de l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Nous avons défini deux catégories d'études selon qu'elles mobilisent ou non explicitement des modèles d'acceptabilité.

Les études relevées renvoient majoritairement à l'acceptabilité sociale de la réalité virtuelle, c'est-à-dire qu'elles cherchent à prédire les intentions d'usage de la réalité virtuelle par des utilisateurs potentiels, et ce, par différentes variables relatives à leurs perceptions sur la technologie ou à certaines de leurs caractéristiques individuelles. Bien que ces études permettent de mettre en évidence différentes variables qui semblent avoir un poids dans la prédiction des intentions d'usage de la réalité virtuelle, on peut leur reprocher d'être décontextualisées. En effet, elles n'intègrent ni l'usage effectif de la technologie ni son contexte. Dès lors, elles ne renseignent ni sur les effets de l'interaction de l'utilisateur avec la réalité virtuelle (acceptabilité pratique), ni sur les limites les apports réels de cette technologie pour les activités de l'utilisateur (acceptation située).

Pour étudier l'adoption de la réalité virtuelle dans des contextes d'usage bien identifiés, il nous semble nécessaire d'intégrer à la fois les perceptions des utilisateurs et l'usage effectif de la technologie. Dans la prochaine partie de ce manuscrit, nous nous appuierons sur les éléments présentés dans cet état de l'art, ainsi que les limites des études antérieures, pour présenter notre problématique de recherche.

PARTIE II. PROBLÉMATIQUE

Notre travail de thèse a pour objectif d'identifier les facteurs et les conditions d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique. Nous expliquerons dans cette partie la construction de notre problématique, en nous appuyant sur des éléments théoriques exposés auparavant dans notre état de l'art.

Nous avons identifié trois approches théoriques de l'acceptabilité des technologies. La première, l'acceptabilité pratique, considère qu'une technologie acceptable est une technologie qui présente une bonne qualité ergonomique en termes d'utilité, d'utilisabilité, d'accessibilité, etc. Pour cette approche, une interaction homme-technologie optimale conduit à l'adoption d'une technologie. Elle propose donc des recommandations pour la conception de technologies acceptables ainsi que des méthodes pour évaluer différentes qualités ergonomiques. La seconde approche, l'acceptabilité sociale, s'appuie sur les théories psychosociales des intentions comportementales (e.g., Ajzen, 1991b). Elle propose d'identifier des facteurs qui prédisent les intentions d'utiliser une technologie, et par extension son utilisation future. Les modèles proposés, notamment le TAM (Davis, 1989) et l'UTAUT (Venkatesh et al., 2003) prédisent les intentions d'utiliser une technologie par les perceptions des utilisateurs sur ses qualités, notamment sur son utilité et sur sa facilité d'utilisation. La troisième approche de l'acceptabilité des technologies s'intéresse à l'expérience réelle des utilisateurs avec la technologie. Elle cherche à identifier les apports et les limites réels de la technologie dans un contexte d'usage donné, en étudiant ce qu'elle permet de faire, ce qu'elle oblige à faire différemment ou ce qu'elle ne permet pas ou plus de faire.

Nous avons conduit une revue de la littérature sur les études empiriques qui traitent de l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Nous avons constaté que ces études se centrent majoritairement sur les perceptions des utilisateurs, ce qui pose plusieurs problèmes. Premièrement, une grande partie de ces études se limitent aux intentions d'usage lorsqu'elles traitent de l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Pourtant, nous savons que les variables des modèles d'acceptabilité n'expliquent pas en totalité les intentions d'usage. Par exemple, dans le TAM, l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue n'expliquent que 40 % des intentions d'usage d'une technologie (Legris et al., 2003). D'autres variables interviennent donc dans la formation des intentions d'usage. Par ailleurs, l'intention d'utiliser une technologie n'entraîne pas nécessairement l'usage effectif, quand bien même il serait possible de déterminer l'ensemble des prédicteurs des intentions d'usage. Certaines études montrent par exemple que les intentions d'usage d'une technologie n'expliquent que 40% de son usage effectif (Legris et al., 2003). Nous pensons que les intentions d'usage à elles seules sont trop limitées pour étudier l'acceptation d'une technologie. En effet, il est possible que les utilisateurs aient des perceptions positives sur une technologie et l'intention de l'utiliser sans qu'ils ne l'utilisent pour autant. Pour cette raison, les perceptions positives sur une technologie et les intentions d'usage ne sont pas suffisantes pour déterminer qu'une technologie est acceptée.

Le second problème concerne l'absence de l'usage effectif dans les études que nous avons répertoriées. En effet, alors qu'elles nous informent sur les perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle dans différents contextes et pour différentes applications, elles ne donnent pas d'informations sur l'interaction homme-technologie et sur l'intégration de la réalité virtuelle aux activités des utilisateurs. En effet, nous ne savons pas ce qui, dans les interactions, favorise ou freine l'acceptation de la réalité

virtuelle, ni ce que cette technologie apporte aux différentes activités des utilisateurs ou ce qu'elle modifie dans ces activités. Nous pensons donc que les études renseignent en partie sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle, notamment sur les perceptions des utilisateurs et leur intention de l'utiliser, mais qu'elles donnent des informations trop lacunaires sur son acceptation. De la même manière, en n'intégrant pas l'usage réel des technologies, elles écartent la possibilité d'une rétroaction de l'utilisation sur les perceptions (Brangier et al., 2009). En effet, il est possible que l'utilisation de la technologie conduise les utilisateurs à changer de perceptions sur ses qualités, voire de changer leurs intentions de l'utiliser.

Pour ces raisons, nous pensons donc qu'il est nécessaire d'intégrer l'usage effectif des technologies dans l'étude de leur acceptation. Toutefois, l'usage effectif seul n'est pas non plus suffisant pour considérer qu'une technologie est acceptée. En effet, certaines technologies peuvent être imposées par une organisation sans que les utilisateurs ne la perçoivent positivement (Brown et al., 2002).

Par conséquent, nous définirons deux versants à l'acceptation d'une technologie : d'une part, les perceptions des utilisateurs à son égard et, d'autre part, son utilisation réelle. Barcenilla et Bastien (2009) proposent d'ailleurs une définition de l'acceptabilité selon ces deux modalités. Ils définissent l'acceptabilité comme le degré d'appropriation et d'intégration d'une technologie dans un contexte d'usage. L'appropriation renvoie « à la façon dont l'individu investit personnellement l'objet ou le système et dans quelle mesure celui-ci est en adéquation avec ses valeurs personnelles et culturelles, lui donnant envie d'agir sur ou avec celui-ci, et pas seulement de subir son usage (Barcenilla & Bastien, 2009, p. 311). L'intégration correspond à « la manière dont le produit, ou système technique, s'insère dans la chaîne instrumentale existante et dans les activités de l'utilisateur, et comment il contribue à transformer ces activités » (Barcenilla & Bastien, 2009, p. 311).

Dans notre travail de thèse, nous adapterons cette définition selon deux dimensions. Nous chercherons à identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans les perceptions des utilisateurs à son égard et dans l'usage réel qu'ils en font. En premier lieu, nous nous intéresserons à la manière dont les utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle et quelles qualités ils lui attribuent. Nous étudierons également leurs intentions (ou non) de l'utiliser. Dans un second temps, nous étudierons l'usage réel de la réalité virtuelle, qui comprend à la fois la façon dont les utilisateurs interagissent avec elle, mais aussi la façon dont elle est intégrée à leurs activités.

Pour répondre à ces objectifs, nous pensons que les trois approches de l'acceptabilité présentées dans notre partie théorique sont complémentaires. En effet, elles peuvent répondre, chacune, à différents éléments de notre problématique. Pour investiguer les perceptions des utilisateurs et leurs intentions d'usage, l'acceptabilité sociale apporte de précieuses pistes, grâce aux modèles d'acceptabilité des technologies développés ainsi qu'aux études empiriques d'ores et déjà conduites sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Pour étudier l'usage effectif de la technologie, nous pouvons mobiliser l'acceptabilité pratique et l'acceptation située. En effet, l'acceptabilité pratique apporte des éclairages sur les dimensions entrant en compte dans les interactions avec les technologies, et notamment sur l'utilisabilité qui a largement été développée en ergonomie. L'acceptation située, quant à elle, nous permet d'identifier les apports et les limites de la réalité virtuelle dans les activités des

utilisateurs. Le Tableau 3 résume les objectifs des deux parties de notre problématique ainsi que les approches mobilisées.

Tableau 3. Synthèse de la problématique (versant de l'acceptabilité étudié, objectifs et approches de l'acceptabilité mobilisées)

	Perceptions des utilisateurs et intentions d'usage	Usage effectif
Objectifs	Comprendre comment les utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle et ses caractéristiques, ainsi que leur intention (ou non) de l'utiliser	Identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans son interaction avec les utilisateurs ainsi que dans son intégration à leurs activités
Approches de l'acceptabilité mobilisées	Acceptabilité sociale	Acceptabilité pratique et acceptation située

Pour répondre à ces objectifs, nous avons conduit cinq études. Trois de nos études sont des études de terrain dans l'industrie aéronautique, où la réalité virtuelle est déjà implantée pour la conception de postes de fabrication. Ces études portent donc sur l'acceptation de la réalité virtuelle. Les études 1 et 2 intègrent à la fois les perceptions des utilisateurs et leur usage effectif de la technologie. L'étude 1 concerne un projet de duplication de poste de fabrication, dont des changements majeurs dans le process – notamment les matériaux et les outils – ont amené les responsables du projet à se tourner vers la réalité virtuelle. Nous avons observé deux revues de projet dans un CAVE et nous avons procédé à des entretiens avec une partie des utilisateurs. L'étude 2 est un projet d'implantation de nouveaux postes de fabrication. Nous avons suivi deux sessions en réalité virtuelle pour ce projet, qui portaient sur trois postes différents. Une des sessions a eu lieu dans le même CAVE que dans l'étude 1, et la seconde session a été conduite à l'aide d'un visio-casque. Là aussi, nous avons conduit des entretiens auprès des utilisateurs. L'étude 4 concerne les perceptions sur la réalité virtuelle de deux chargés de réalité virtuelle de l'entreprise. Nous avons conduit des entretiens semi-directifs avec ces personnes pour recueillir leurs perceptions.

Dans les études 3 et 5, nous nous sommes intéressée à des situations où la réalité virtuelle n'est pas utilisée, nous avons donc conduit nos études auprès de potentiels futurs utilisateurs de cette technologie. Il s'agit donc d'études portant sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. L'étude 3 porte sur des salariés de Stelia Aerospace, qui est donc équipée en technologies de réalité virtuelle, mais qui n'utilisant pas ces technologies. Nous parlerons donc ici de non-utilisateurs. Dans cette étude, nous nous sommes intéressée à leurs perceptions sur cette technologie qu'ils connaissent sans utiliser. L'étude 5 est une expérimentation visant à tester un modèle d'acceptabilité de la réalité virtuelle pour la formation au montage aéronautique. Elle a été conduite auprès d'étudiants en psychologie et d'étudiants en école d'ingénieur. Il s'agit, là aussi, d'étudier les perceptions de futurs utilisateurs sur la réalité virtuelle ainsi que d'étudier leur intention (ou non) de l'utiliser.

PARTIE III. ÉTUDES SUR L'ACCEPTABILITÉ ET L'ACCEPTATION DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE DANS L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE

Pour répondre à notre problématique, qui traite du processus d'acceptabilité de la réalité virtuelle, nous avons conduit cinq études. Les quatre premières ont eu lieu en situation de travail auprès de réels et potentiels utilisateurs de la réalité virtuelle au sein de Stelia Aerospace, sur le site de Méaulte (Somme). La dernière était une expérimentation réalisée auprès d'étudiants, potentiels futurs utilisateurs, en partenariat avec l'équipe Heudiasyc⁸ (UMR CNRS 7253) de l'Université Technologique de Compiègne (UTC).

Avant de présenter ces études, il convient de présenter brièvement Stelia Aerospace, où les études ont été réalisées. Stelia Aerospace est une filiale d'Airbus Group, groupe industriel européen pionnier dans le monde de l'aéronautique. Airbus Group est né en 2000 par la réunion de constructeurs français, allemands, espagnols et britanniques sous le nom d'EADS (*European Aeronautic Defence and Space Company*). En 2014, il change de nom pour Airbus Group et choisit de se déclinier en trois divisions : Airbus, pour les avions civils ; Airbus Defence and Space, pour les avions militaires, les équipements spatiaux, les systèmes de défense et de sécurité ; et Airbus Helicopters, pour les hélicoptères civils et militaires. Le chiffre d'affaires du groupe est de 63,7 milliards d'euros en 2018 et il emploie aujourd'hui plus de 130 000 salariés.

Le groupe Stelia Aerospace appartient à la division Airbus. Il est né en 2015 de la fusion entre Aerolia et Sogerma. Il est spécialisé dans la conception et la fabrication d'aérostructures (pointes avant, sections de fuselage...) et de sièges pilotes et de fauteuils passagers des classes Affaire et Première Classe. Les clients de Stelia sont des grands noms de l'aéronautique. Airbus est son client principal, mais elle produit également pour Bombardier, Dassault ou Embraer, ainsi que pour des compagnies aériennes. Stelia Aerospace emploie actuellement plus de 7 000 salariés et possédait un chiffre d'affaires de 2,2 milliards d'euros en 2018. Sa production est répartie sur plusieurs sites en France et à l'étranger (Amérique du Nord, Europe, Afrique, Moyen-Orient, Asie). Les sites français sont localisés à Mérignac, Rochefort, Saint-Nazaire, Toulouse et Méaulte. C'est sur ce dernier site qu'ont eu lieu nos études.

C'est un site ancien, né en 1922, qui a connu de nombreux changements de propriétaire (Nord Aviation, EADS, puis Airbus, et enfin Stelia Aerospace). Aujourd'hui, il est spécialisé dans la conception et la fabrication de sous-ensembles, de pointes avant et d'éléments de fuselage métalliques, composites ou hybrides. La production est divisée en différents programmes, selon les familles d'avions du client Airbus. On trouve ainsi :

- le programme *Single Aisle* (SA) avec les avions de la famille de l'A320 ;
- le programme *Long Range* (LR) avec l'A330 et l'A340 ;
- le programme *Extra Wide Body* (XWB) avec l'A350 ;
- le programme *Large Aircraft* (LA) avec l'A380 ;

⁸ L'équipe Heudiasyc (Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes) est une équipe de recherche qui opère dans les sciences de l'information et du numérique, notamment en informatique, en automatique, en robotique et en intelligence artificielle.

- le programme *Military Aircraft* (MA) avec l'A400M.

Il existe également un programme Bombardier. Le site emploie plus de 1 500 personnes, mais, compte tenu de la présence de nombreux sous-traitants, on estime que plus de 3 000 personnes sont présentes sur le site.

Les sessions en réalité virtuelle auxquelles nous avons assisté ont eu lieu à IndustriLAB, qui est un centre de recherches, d'innovation, de formation et de transfert technologique. Il est né du partenariat entre Stelia Aerospace et l'ancienne Région Picardie et il est financé aujourd'hui par la Région Hauts-de-France et par l'Union Européenne dans le cadre du FEDER⁹. Il permet aux industriels de louer des espaces (halles industrielles, ateliers, bureaux, salles de réunion...) et des équipements (logiciels de CAO¹⁰ et de simulation, cellules robotisées, moyens de mesure...) afin qu'ils puissent réaliser leurs projets. Stelia Aerospace a accès à des dispositifs de réalité virtuelle de type visio-casque, CADwall¹¹ et CAVE¹² par l'intermédiaire d'IndustriLAB. Les deux études réalisées à Stelia Aerospace sur l'acceptation de la réalité virtuelle ont eu lieu dans le CAVE d'IndustriLAB.

La cinquième étude de notre travail de thèse a eu lieu à la fois dans les locaux de l'Université de Picardie Jules Verne et de l'Université Technologique de Compiègne. Le CAVE utilisé appartient à la plateforme Translife, hébergée par Heudiasyc et financée par la Région Hauts-de-France et par l'Union Européenne dans le cadre du FEDER. Nous rappelons les cinq études menées dans le Tableau 4.

Tableau 4. *Phase du processus d'acceptabilité étudié, participants et lieux des quatre études menées*

	Phase du processus d'acceptabilité	Participants à l'étude	Lieu de l'étude
Étude 1	Acceptation	Utilisateurs de la réalité virtuelle (préparateurs aéronautiques, compagnons, etc.)	Stelia Aerospace
Étude 2	Acceptation	Utilisateurs de la réalité virtuelle (préparateurs aéronautiques, compagnons, etc.)	Stelia Aerospace
Étude 3	Acceptabilité	Non-utilisateurs de la réalité virtuelle (outilleurs et préparateurs aéronautiques)	Stelia Aerospace

⁹ Le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) a pour objectif de corriger les déséquilibres entre les régions de l'Union Européenne afin d'en renforcer la cohésion économique et sociale. Dans ce cadre, différents objectifs ont été fixés pour financer des projets de recherche, améliorer l'accès aux technologies, développer des transports durables, investir dans l'éducation, etc.

¹⁰ Les logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) permettent de concevoir, visualiser et simuler des produits.

¹¹ Un CADwall est un système de projection sur mur permettant une vision stéréoscopique d'un environnement virtuel.

¹² Un CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) est un système de visualisation cubique dont trois à six faces sont des écrans.

Étude 4	Acceptation	Chargés de réalité virtuelle	Stelia Aerospace
Étude 5	Acceptabilité	Potentiels futurs utilisateurs de la réalité virtuelle (étudiants)	UTC et UPJV

CHAPITRE 1.

ÉTUDE 1 : PROJET DE MODIFICATION DE POSTES D'ASSEMBLAGE

1. OBJECTIFS

La première étude que nous allons présenter concerne l'utilisation de la réalité virtuelle dans un projet de conception de poste de fabrication à Stelia Aerospace. Dans cette étude, nous cherchions à identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de cette technologie à la fois selon les perceptions des utilisateurs à son égard et selon l'usage qu'ils en font. Cette étude répondait donc à deux objectifs. En premier lieu, il s'agissait de comprendre comment les utilisateurs percevaient la réalité virtuelle et ses caractéristiques, ainsi que leurs intentions (ou non) de l'utiliser. En second lieu, il s'agissait d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'usage réel des utilisateurs avec la technologie. Les trois approches de l'acceptabilité sont mobilisées dans cette étude : l'acceptabilité sociale pour répondre au premier objectif ; l'acceptabilité pratique et l'acceptation située pour répondre au second.

2. ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Le projet de conception de poste que nous avons suivi est un projet de modification de process qui a entraîné la conception de nouveaux postes d'assemblage d'aérostructures. Nous présenterons dans cette section les différents métiers qui ont pris part à ce projet.

D'abord, deux personnes que nous qualifierons par les termes généraux de « chargés de réalité virtuelle » ont accompagné les participants aux sessions. Ce sont des salariés du service R&T (Recherche et Technologie) de Stelia Aerospace, qui appartiennent au site de Méaulte, mais qui sont localisés géographiquement à IndustriLAB. Leurs missions au sein du service R&T sont variées, mais, dans le cadre de nos recherches, nous nous intéressons uniquement à leurs activités autour de la réalité virtuelle, et plus particulièrement, à leur implication dans les projets de conception où la réalité virtuelle est utilisée. Ce sont eux qui organisent les sessions en réalité virtuelle et qui accompagnent les équipes de conception dans l'utilisation de la technologie. Pour commencer, lors d'une première rencontre avec les personnes qui désirent intégrer la réalité virtuelle à un projet de conception, ils présentent la technologie et ses fonctionnalités. À cette occasion, ils cherchent également à identifier les besoins des demandeurs. Une fois qu'ils ont compris quels étaient leurs objectifs et leur projet dans ses grandes lignes, ils demandent une maquette en CAO (modélisée à l'aide du logiciel CATIA®¹³) aux demandeurs. À partir de cette maquette, ils formalisent l'environnement qui sera utilisé lors des sessions. Ils collaborent avec les demandeurs afin de construire un environnement virtuel qui leur permettra de répondre aux objectifs de ces derniers, par exemple, en y intégrant des outils qui seront manipulables lors des sessions. Enfin, les chargés de réalité virtuelle accompagnent les utilisateurs dans l'utilisation de la technologie lors des sessions. Un des chargés de réalité virtuelle accompagne les sessions ayant lieu dans le CAVE, et

¹³ CATIA® est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui permet de modéliser et de simuler des produits. Dans l'entreprise, il est utilisé pour modéliser des pièces, des éléments des avions, des postes d'assemblage, de petits outillages, etc.

le second celles où le visio-casque est utilisé. Nous consacrerons une partie de la discussion de ce chapitre à la présentation de leurs rôles lors de ces sessions.

Différents métiers sont amenés à utiliser la réalité virtuelle. D'abord, on trouve les membres de l'équipe de conception. Dans les études que nous avons conduites, il s'agissait principalement de préparateurs aéronautiques et de chargés d'affaire outillage. Les préparateurs aéronautiques sont à l'interface entre le bureau d'études et la production. Ils sont chargés de formaliser un produit demandé par le client (Airbus, par exemple) en une gamme de montage de l'avion accompagnée de fiches techniques, de fiches d'instructions, etc. En d'autres termes, ils formalisent un process à partir d'une commande. Ils veillent également à la bonne application du process en production et à relever des améliorations possibles du poste qui peuvent être remontées par les opérateurs.

Les chargés d'affaires outillage participent à la conception de postes de fabrication (bâtis), de stations de mesure des éléments avions et d'outillages variés, tels que des chariots ou des grilles de perçage, etc. Pour cela, ils travaillent en collaboration entre le demandeur de l'outillage (il peut s'agir d'un service, d'un programme, etc.), différents services de Stelia (comme les méthodes, les moyens généraux, le service achats ou encore le service prévention) et des fournisseurs. L'objectif du travail des chargés d'affaires est d'établir un cahier des charges pour la fabrication d'un outillage, de choisir un fournisseur et de collaborer avec lui et les différents acteurs du projet afin de définir dans le détail les caractéristiques de l'outillage à fabriquer. La spécification du futur outillage s'appuie sur une maquette CAO, qui évolue au fur et à mesure des études et des rencontres entre les différents acteurs du projet, jusqu'à la fabrication et l'implantation de l'outillage.

Des monteurs-ajusteurs (qui sont appelés « compagnons » dans l'industrie aéronautique) ont également participé à ces sessions. Ils sont chargés d'assembler des aérostructures en réalisant un ensemble d'opérations d'assemblage de pièces aéronautiques (par exemple, du perçage, de l'alésage ou du rivetage). Enfin, d'autres métiers sont intervenus ponctuellement pendant les sessions, par exemple, des animateurs qualité ou encore des managers issus de la production, comme des chefs de ligne ou des chefs d'équipe.

Nous avons pu suivre ce projet après avoir été invitée à la première rencontre entre les chargés de réalité virtuelle et les préparateurs aéronautiques en charge des nouveaux postes à implanter. Lors de cette réunion, nous avons pu présenter notre projet de thèse – nous avons parlé d'étudier *l'utilisation* de la réalité virtuelle pour éviter des biais de désirabilité sociale, d'autant plus que nous rencontrions les préparateurs en étant accompagnés des chargés de réalité virtuelle. Ils ont accepté que nous observions les sessions en réalité virtuelle et que nous conduisions des entretiens auprès des personnes amenées à intervenir dans ce projet.

Lors de cette réunion, les préparateurs ont également expliqué que différentes raisons les avaient amenés à intégrer la réalité virtuelle dans ce projet, notamment l'ampleur des modifications apportées au process de fabrication. Nous reviendrons plus en détail sur les motivations des préparateurs à utiliser la réalité virtuelle dans la présentation des résultats de cette étude.

3. MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette étude était d'étudier l'acceptation de la réalité virtuelle, et plus spécifiquement, d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de cette technologie

en regard des perceptions des utilisateurs et de l'usage qu'ils en faisaient. Différentes méthodes ont été utilisées pour le recueil et l'analyse de nos données. Nous les décrivons ici.

3.1. Recueil des données

Pour le recueil de nos données, nous avons eu recours à deux méthodes : des entretiens semi-directifs et des observations filmées des sessions en réalité virtuelle.

3.1.1. Entretiens semi-directifs

Les entretiens semi-directifs avaient pour objectif d'étudier les perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle et d'appréhender leurs intentions (ou non) de l'utiliser à nouveau. Nous commencerons par décrire notre guide d'entretien, puis les caractéristiques des personnes interviewées.

3.1.1.1. Guide d'entretien

Nous avons construit notre guide d'entretien à partir de notre revue de la littérature sur l'acceptabilité des technologies (Partie I. Chapitre 3) et sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle (Partie I. Chapitre 4). Pour les deux entretiens *a priori* des sessions en réalité virtuelle, il s'agissait de recueillir :

- des informations générales sur la personne interrogée ;
- une description de ses expériences antérieures avec la réalité virtuelle ;
- une description des outils habituellement utilisés dans les projets de conception ;
- ses attentes vis-à-vis de la réalité virtuelle dans le projet.

Nous avons formalisé un second guide d'entretien, qui a été notre principal guide d'entretien dans le cadre de ce travail de recherche. Il était utilisé avec les utilisateurs suite aux sessions afin de les interroger sur la manière dont ils percevaient la réalité virtuelle ainsi que sur leurs intentions de l'utiliser à nouveau. Nous abordions différentes thématiques :

- une présentation générale de la personne interrogée, ainsi que des outils qu'elle utilise habituellement dans les projets de conception ;
- son expérience antérieure avec la réalité virtuelle ;
- ses perceptions sur la réalité virtuelle, notamment sur son utilité dans le projet ;
- une comparaison de la réalité virtuelle et de la CAO ;
- la manière dont la réalité virtuelle a été intégrée dans le projet de conception ;
- ses intentions d'usage de la réalité virtuelle.

Le guide d'entretien complet se trouve en annexe (Annexe 1, p. 261).

3.1.1.2. Caractéristiques des personnes interviewées

Au total, nous avons conduit cinq entretiens pour cette étude. Deux entretiens ont été réalisés avec les préparateurs en amont des sessions. Suite aux sessions, nous avons interrogé un des préparateurs rencontrés lors de la première phase de l'étude et deux compagnons. Le Tableau 5 reprend les informations principales sur les personnes interrogées.

Nous appellerons « Préparateur 1 » le responsable de projet, et « Préparateur 2 » le second préparateur en charge du projet. Nous appellerons les deux compagnons respectivement « Compagnon 1 » et « Compagnon 2 ».

Les personnes rencontrées sont expérimentées à leur poste : elles l'ont occupé entre 3 et 10 ans. Aucune des personnes interrogées n'avait déjà utilisé la réalité virtuelle dans un projet de conception. Toutefois, il est à noter que deux personnes ont des expériences antérieures avec la réalité virtuelle. Le préparateur 1 a une expérience ancienne de la réalité virtuelle sur le site de Méaulte, où, lorsqu'il était compagnon, il avait visité virtuellement un avion qu'il devait aller réparer sur un autre site. Le compagnon 2 n'a jamais utilisé la réalité virtuelle dans le cadre de son travail, mais il est équipé à son domicile et il a une bonne connaissance de la réalité virtuelle pour le jeu vidéo.

Tableau 5. *Caractéristiques des personnes interviewées lors de l'étude 1*

Interviewés	Ancienneté	Expérience antérieure avec la réalité virtuelle (dans un projet de conception)	Entretien
Préparateur 1 (project leader)	20 ans dans l'usine, 10 ans à ce poste	Non Expérience antérieure ancienne : présentation d'un avion à aller réparer sur un autre site	Avant et après les sessions
Préparateur 2	7 ans à ce poste	Non	Avant les sessions
Compagnon 1	20 ans, 7 ans à ce poste	Non	Après les sessions
Compagnon 2	19 ans dans l'usine, 3 ans à ce poste	Non Bonne connaissance de la réalité virtuelle pour le jeu vidéo	Après les sessions

Nous avons pu nous entretenir avec les deux responsables de projet avant les sessions en réalité virtuelle. Toutefois, suite aux sessions, le préparateur 2 n'a pas pu, pour des raisons personnelles, réaliser un second entretien. Nous reviendrons plus en détail sur ce point lorsque nous discuterons des limites de cette étude.

D'autres utilisateurs ont participé aux sessions en réalité virtuelle, mais ponctuellement, toujours en assistant à la session sans manipuler l'environnement virtuel et parfois pour une durée très courte. Pour cette raison, et pour un accès difficile aux populations concernées (animateurs qualité, managers), nous n'avons interrogé que les utilisateurs principaux des sessions : les deux préparateurs ainsi que les deux compagnons qui seraient amenés à travailler sur les postes conçus dans le cadre de ce projet.

3.1.2. Observations filmées des sessions en réalité virtuelle

Afin d'étudier la manière dont la réalité virtuelle était utilisée par les participants aux sessions, nous avons observé les sessions. Pour cela, nous avons filmé l'utilisation du CAVE et nous avons effectué des enregistrements audio des communications entre les utilisateurs.

3.1.2.1. Conditions et dispositifs d'enregistrement

Les sessions en réalité virtuelle ont eu lieu dans le CAVE d'IndustriLAB. À la demande du chargé de réalité virtuelle, les utilisateurs faisaient majoritairement face à sa face centrale (Figure 21).



Figure 21. CAVE, sans environnement virtuel pour des questions de secret industriel.

Deux types de lunettes 3D actives étaient utilisées (Figure 22). Une paire était équipée de cibles infrarouges : elle était traquée par le CAVE et elle suivait donc les mouvements de tête et les déplacements de l'utilisateur. Les autres paires permettaient simplement une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel.



Figure 22. Lunettes Edge VR à 3D active de marque Volfoni. Photographie reproduite avec autorisation de Volfoni Group.

Le logiciel utilisé lors des sessions en réalité virtuelle sur le CAVE est le logiciel RHEA¹⁴ (*Realistic Human Ergonomics Analysis*), développé par Airbus Group Innovations et diffusé par Optis. Les utilisateurs se partageaient une manette de type Flystick (Figure 23), qui leur permettait d'utiliser les différentes fonctionnalités du

¹⁴ Le logiciel RHEA permet de construire un environnement virtuel immersif à partir d'une maquette CAO. Le logiciel propose ensuite différentes fonctionnalités aux utilisateurs lors de leur immersion : ils peuvent par exemple saisir des objets, évaluer leurs angles articulaires ou mesurer des distances entre deux points. L'objectif du logiciel RHEA est de permettre de visualiser et d'expérimenter sur des produits en cours de conception.

logiciel (déplacements, saisie d'objet, etc.). Nous donnerons une liste de ces fonctionnalités plus tard dans ce chapitre en présentant notre grille d'observation.



Figure 23. Flystick 2 de marque ART.
Photographie reproduite avec autorisation de ART GmbH.

Afin d'avoir une vue globale de l'environnement virtuel, nous nous tenions avec un caméscope derrière les utilisateurs. Nous avons placé une seconde caméra de type GoPro à l'intérieur du CAVE, afin de voir plus aisément qui tenait la manette, les commandes utilisées, ainsi que pour identifier quelle personne prenait la parole.

Un enregistrement audio des sessions a également été nécessaire. Il nous permettait de recueillir les échanges entre les différents participants à ces sessions en réalité virtuelle. Puisque des conversations simultanées pouvaient avoir lieu dans la salle où se déroulait la session, nous avons ajouté un dictaphone à l'intérieur du CAVE pour recueillir les échanges des utilisateurs sans être gênés par les conversations alentour.

Deux types de données ont ainsi été recueillis : des données vidéos des sessions (sous deux angles de vue) et un enregistrement audio de ces sessions.

3.1.2.2. Utilisateurs participant aux sessions de travail en réalité virtuelle

Deux sessions en réalité virtuelle ont eu lieu. Deux matinées (de 9 h à 12 h) ont été réservées à IndustriLAB. Ces demi-journées n'étaient pas consacrées exclusivement à l'utilisation de la réalité virtuelle ; elles comprenaient également les temps d'installation du CAVE, les temps d'utilisation du CAVE, les moments d'échanges avant, pendant et après l'utilisation ainsi que les temps de pause. Pour donner des informations plus précises sur l'utilisation de la réalité virtuelle en elle-même, nous pouvons nous appuyer sur les vidéos codées. Pour la première session, 1 h 40 d'utilisation du CAVE a été codée ; et pour la seconde, 2 h 09.

Lors de la première session, seuls les préparateurs en charge du projet étaient présents. Ils ont été rejoints en fin de session par deux autres préparateurs à qui ils ont présenté les postes d'assemblage. Le Tableau 6 présente les participants à cette session, le temps qu'ils ont passé dans le CAVE et s'ils ont utilisé ou non la manette.

Tableau 6. *Participants à la première session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette*

Participant à la session	Temps total passé dans le CAVE	Proportion de temps de la session passé dans le CAVE	Utilisation de la manette
Chargé de réalité virtuelle	38 min 53	38 %	Oui
Préparateur 1 (project leader)	31 min 17	31 %	Non
Préparateur 2	1 h 37 min 16	71 %	Oui
Préparateur 3	40 min 48	40 %	Non
Préparateur 4	23 min 43	23 %	Non
Préparateur 5	23 min 44	23 %	Non

À l'inverse, la seconde session, toujours conduite par les préparateurs 1 et 2, a mobilisé plus d'utilisateurs, qui occupaient différents métiers. Au total, treize utilisateurs se sont tenus dans le CAVE, par groupes successifs de deux à cinq, avec des différences importantes dans les durées d'utilisation, qui s'étendent de 4 min pour une animatrice qualité à 1h37 pour le préparateur 2. Il est à noter qu'une partie importante de ces utilisateurs n'a pas utilisé la manette, mais a simplement visualisé l'environnement virtuel. Le Tableau 7 présente les participants à cette seconde session en réalité virtuelle.

Tableau 7. *Participants à la seconde session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette*

Participant à la session	Temps passé dans le CAVE (cumulé)	Proportion de temps de la session passé dans le CAVE	Utilisation de la manette
Chargé de réalité virtuelle	17 min 7	13 %	Oui
Préparateur 1 (project leader)	14 min 45	11 %	Non
Préparateur 2	1 h 37 min 54	75 %	Oui
Compagnon 1	42 min 53	33 %	Non
Compagnon 2	1 h 33 min 14	71 %	Oui
Chef équipe 1	40 min 06	31 %	Non
Chef équipe 2	36 min 14	27 %	Non
Production	20 min 54	16 %	Non
Production 2	22 min 41	17 %	Non
Chef de ligne	22 min 32	17 %	Non
Animatrice qualité 1	4 min 42	3 %	Non
Animatrice qualité 2	22 min 29	17 %	Non
Préparateur 6	05 min 48	4 %	Non

3.2. Méthodes de traitement des données

3.2.1. Analyse thématique des entretiens

Nous avons entièrement retranscrit les entretiens et nous avons procédé à une analyse thématique des données (Braun & Clarke, 2006). Elle consiste à identifier des patterns dans les données, à les regrouper en catégories de sens, puis en thématiques. Braun et Clark (2006) identifient six étapes dans la conduite d'une analyse thématique de données :

1. Se familiariser avec les données : lire et relire les transcriptions.
2. Coder : créer des codes qui identifient des aspects importants des données, collecter des extraits pour chacun des nœuds.
3. Rechercher des thèmes : examiner les codes construits et identifier des patterns plus larges.
4. Réviser les thèmes : confronter les thèmes et les données, s'assurer qu'ils sont cohérents. Les thèmes peuvent être redéfinis, découpés, combinés, voire supprimés à cette étape.
5. Nommer et définir les thèmes : développer une analyse détaillée de chaque thème, leur choisir un nom.
6. Rédiger un rapport : lier l'analyse des données et les extraits de données, contextualiser les résultats en regard de la littérature existante.

Nous avons suivi ces différentes étapes dans l'analyse de nos données. Nous décrivons ici les grandes lignes de notre analyse. Pour coder nos transcriptions d'entretiens, nous avons utilisé le logiciel d'analyse de données qualitatives Nvivo 12 (QSR International Pty Ltd, 2019). Il nous a permis de créer une grille de codage composée de différents codes (appelées *nœuds* par le logiciel). Sur Nvivo, chaque nœud a un nom et il est possible de leur attribuer une description. Nous avons pris soin de nommer et de rédiger une description pour chaque nœud, à la fois pour garder une trace de nos réflexions pour la suite de nos analyses, mais également pour permettre un potentiel codage par d'autres. Ces descriptions étaient précises et comportaient des verbes d'action. Par exemple, nous décrivions la catégorie *Expérience antérieure* de la manière suivante : « Retracer / fait référence à une expérience antérieure avec la réalité virtuelle ».

Nous avons procédé de manière itérative à l'analyse de nos entretiens. Afin de garder une trace de ces différentes itérations, nous avons tenu un journal d'analyse de nos données. Dans ce journal, nous notions les dates de nos relectures et de nos codages d'entretiens, les entretiens concernés et surtout les modifications apportées au codage. Le report de ces modifications était accompagné de citations afin d'illustrer et de garder une trace de notre raisonnement. Nous pouvions créer une nouvelle sous-catégorie à notre grille de codage suite à des aspects nouveaux non abordés dans les entretiens analysés précédemment. Par exemple, la citation « *Et donc ça devrait être entre guillemets obligatoire* » nous a amenés à créer une nouvelle sous-catégorie Obligation d'utiliser, que nous décrivions de la manière suivante : « *Exprime l'idée que l'utilisation de la réalité virtuelle devrait être obligatoire / imposée.* ».

3.2.2. Codage des vidéos des sessions en réalité virtuelle

Afin de caractériser les interactions des utilisateurs avec la réalité virtuelle, nous avons procédé à un codage de leurs comportements lors des sessions. Nous avons procédé à cette analyse à l'aide du logiciel The Observer XT 14 (Noldus, 2017). Ce logiciel permet d'encoder et d'analyser des comportements à partir de vidéos. Pour ce faire, l'utilisateur crée une grille de codage qui comprend les différentes personnes qu'il observe et leur comportement. Pendant le visionnage des vidéos, il indique au logiciel à partir de la grille construite les différents comportements qu'il observe (Figure 24). Le logiciel permet ensuite d'obtenir différents types de résultats, selon les objectifs des chercheurs, comme des données sur les durées d'un comportement, sur son nombre d'occurrences, sur sa cooccurrence avec un autre comportement, etc.

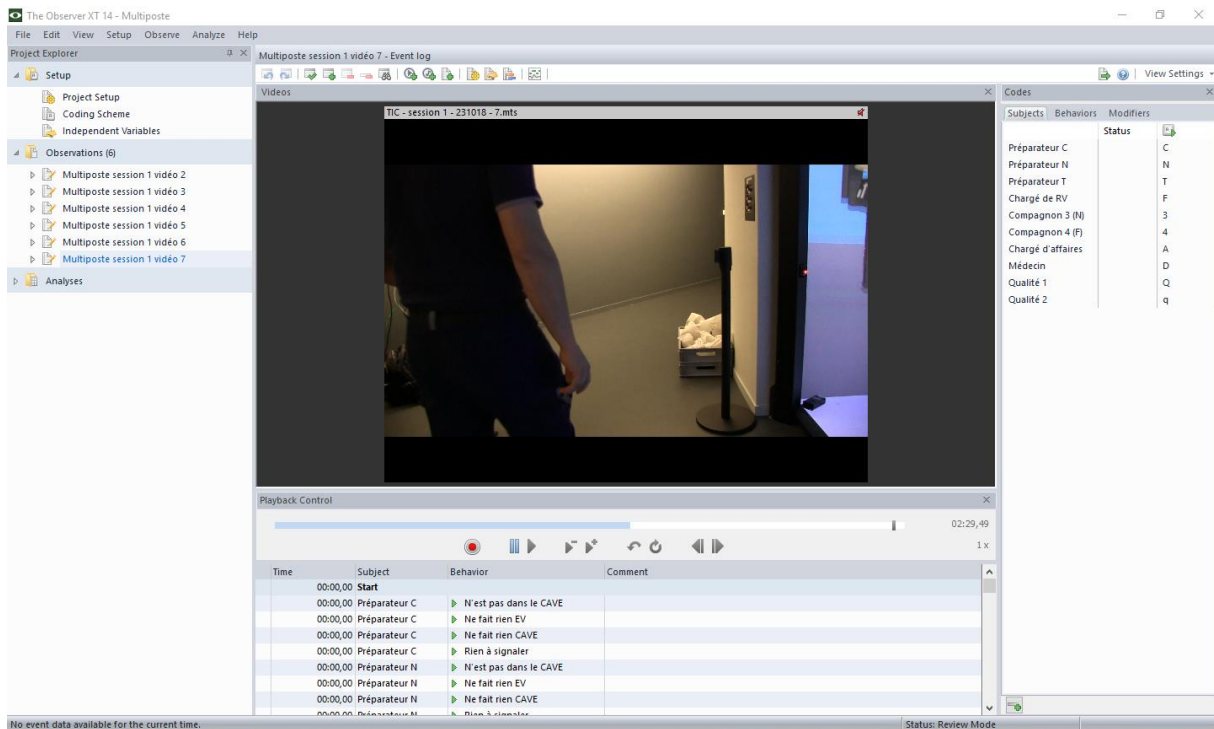


Figure 24. Interface de The Observer XT 14 lors du visionnage et du codage des vidéos.

(La vidéo montrée sert d'exemple et n'appartient pas à cette étude).

Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons principalement aux différents comportements des utilisateurs dans le CAVE, à leur durée et à leur proportion en fonction du temps global de la session.

Nous avons relevé deux catégories de comportements : d'une part, les comportements de l'utilisateur dans la salle immersive et, d'autre part, les comportements de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. La première catégorie de comportements nous permettait de mettre en évidence les interactions de l'utilisateur avec les dispositifs de contrôle. La seconde catégorie de comportements nous permettait d'identifier les fonctionnalités du logiciel utilisées lors des sessions. Enfin, nous avons décidé d'ajouter une troisième catégorie dans la grille de codage qui concerne les entrées et les sorties du CAVE par les utilisateurs. Cette catégorie nous permettait d'établir le temps passé dans le CAVE par chacun des utilisateurs. Le Tableau 8 reprend notre grille de codage.

Tableau 8. Grille de codage des sessions en réalité virtuelle

Comportements dans le CAVE	Comportements dans l'EV	Entrées / Sorties
<ul style="list-style-type: none"> • Ne fait rien dans le CAVE • Tient la manette • Porte les lunettes traquées • Porte les lunettes spectateurs • Porte des capteurs de mouvements 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne fait rien dans l'EV • Se déplace dans l'EV • Survole l'EV • Parcourt les menus • Modifie la vitesse de déplacement • Saisit un objet / lâche un objet • Mesure une distance entre deux objets • Utilise l'outil de capture d'écran • Pointe avec l'outil laser dans l'EV • Met en transparence une pièce • Utilise l'outil de capture de mouvements • Utilise la lampe torche 	<ul style="list-style-type: none"> • N'est pas dans le CAVE • Est dans le CAVE • Entre • Sort

Il est à noter que certaines « absences » de comportements ont dû être ajoutées à la grille, car le logiciel a besoin d'un comportement par défaut. Nous avons défini « ne fait rien dans le CAVE », « ne fait rien dans l'environnement virtuel » et « n'est pas dans le CAVE » comme des comportements par défaut.

3.2.3. Recueil des dysfonctionnements et des difficultés de manipulation

Nous avons également relevé des indices renvoyant à l'utilisabilité du système (et donc à son acceptabilité pratique). Lors du codage des vidéos des sessions en réalité virtuelle, nous avons répertorié les dysfonctionnements de la technologie, ainsi que les difficultés rencontrées par les utilisateurs pour se servir de certaines fonctionnalités.

Pour identifier les dysfonctionnements, nous nous sommes appuyée sur le visionnage des vidéos ainsi que sur les verbalisations des utilisateurs (par exemple, le chargé de réalité virtuelle disant : « : *Elles [les lunettes] se synchronisent pas celles-là* »). Pour identifier les difficultés des utilisateurs, nous nous sommes appuyée sur le nombre d'essais de l'utilisateur pour effectuer une manipulation ou sur les verbalisations simultanées pouvant indiquer une erreur (par exemple le préparateur 2 disant « *Zut, qu'est-ce que j'ai fait ?* » suivi par la réponse du chargé de réalité virtuelle : « *Là t'as attrapé le... là t'as bougé le bâti* »).

3.2.4. Analyse des communications lors des sessions en réalité virtuelle

Le troisième type d'analyse que nous avons conduit concernait les communications entre les utilisateurs durant les sessions. Cette analyse avait plusieurs objectifs. Le premier était de rendre compte de l'activité de conception des participants lors des sessions. Le second objectif était de caractériser la manière dont les utilisateurs se partagent la technologie (le CAVE) et l'environnement virtuel. Enfin, nous cherchions à identifier le rôle du chargé de réalité virtuelle dans ces sessions. Pour répondre à ces objectifs, nous avons construit deux grilles : la première servait à coder l'activité de conception et la seconde permettait de coder les éléments relatifs au partage de la technologie et de l'environnement virtuel. Le rôle du chargé de réalité virtuelle est à extraire des résultats obtenus avec la seconde grille.

Nous nous sommes inspirée de la grille de codage des communications dans des environnements virtuels collaboratifs de Maher, Gül, et Bilda (2000). Cette grille permet de coder les communications qui concernent les fonctionnalités du logiciel et la manière dont les utiliser, la conception en elle-même, la conscience des autres et les représentations externes. Par exemple, les communications sur le processus de conception comprennent la proposition d'une solution, sa clarification ou encore son évaluation. Tout comme le proposent ces auteurs, nous avons établi des catégories relatives à la revue de projet en elle-même et à l'utilisation de la réalité virtuelle.

Nous avons privilégié une approche inductive dans la construction de nos grilles d'analyse : nous nous sommes appuyée sur les transcriptions des sessions pour formaliser nos différentes catégories de codes. Tout comme pour le codage de nos entretiens, le codage de ces communications a été itératif : nous avons modifié notre grille au fur et à mesure du codage. Le corpus final s'étalait sur 86 pages – 36 pages pour la première session et 50 pour la seconde. Nous avons défini au total 28 catégories de communication. Dans un tableau en annexe (Annexe 2, p. 261), nous reprenons les 28 catégories que nous avons définies et leurs définitions. L'ensemble des codes est illustré par un exemple.

Pour faciliter la restitution de nos résultats, nous les avons ensuite regroupés en cinq catégories :

- *l'utilisation de la technologie*, qui regroupe les communications relatives à l'utilisation collective du CAVE et au partage de l'environnement virtuel ;
- *le partage de point de vue*, qui renvoie aux communications relatives aux différences dans la visualisation de l'environnement virtuel ;
- *la revue de projet*, qui comprend les communications relatives au processus de revue des postes d'assemblage conçus ;
- *les références au monde physique*, où nous avons placé les communications qui font des liens entre l'environnement virtuel et le monde physique ;
- une catégorie *Autres*, à laquelle nous avons attribué les communications qui n'appartenaient à aucune des autres catégories.

Nous avons également relevé les références à l'environnement virtuel, que nous avons placées dans une catégorie à part. Ce code est utilisé en combinaison avec les codes des autres catégories. Par exemple, la citation « *On vient l'équiper de toutes les ferrures bleues avec ces petits outillages là de mise en référence* » est une explication de la future tâche qui comporte des références à l'environnement virtuel. Alors que les autres catégories indiquent la nature des communications, les

références à l'environnement virtuel donnent un éclairage sur les indices déictiques utilisés par les utilisateurs lors des sessions. Ce code ne sera donc pas comptabilisé au même titre que les autres catégories dans les résultats.

4. RÉSULTATS

Dans cette section, nous présenterons les résultats obtenus dans cette étude. Nous commencerons par les résultats sur les attentes et sur les perceptions des utilisateurs, obtenus à l'aide des entretiens. Nous décrirons ensuite les résultats sur l'usage de la réalité virtuelle, obtenus par le biais des analyses des vidéos et des communications entre les utilisateurs.

4.1. Attentes des préparateurs *a priori* des sessions en réalité virtuelle

Nous avons conduit des entretiens *a priori* des sessions en réalité virtuelle avec les deux préparateurs en charge du projet. Ces entretiens avaient pour objectif d'identifier leurs attentes vis-à-vis des sessions en réalité virtuelle.

Certaines de ces attentes étaient partagées par les deux compagnons, alors que d'autres n'ont été rapportées que par l'un ou l'autre d'entre eux. Pour commencer, ils attendaient tous les deux de la réalité virtuelle de pouvoir :

- visualiser l'aménagement du poste (« *Voir donc déjà la zone, voir l'aménagement qu'on lui a fait* », préparateur 1) ;
- évaluer l'ergonomie du poste, entendue principalement sous l'angle des contraintes posturales (« *Le plus important c'est donc déjà de voir les postures du compagnon* », préparateur 1) ;
- vérifier le process établi, vérifier s'il fallait changer l'ordre de réalisation de certaines opérations (« *On va pouvoir tester si on monte telle ou telle pièce avant une autre* », préparateur 2) ;
- tester les outils qui étaient envisagés, notamment leur accessibilité dans certaines zones de travail (« *Voir les encombrements de l'outil* », préparateur 1) ;
- appréhender certaines propriétés physiques du poste, notamment les largeurs des allées de passage (« *Me rendre compte des volumes, vraiment des volumes entre des bâtis* », préparateur 2) ou les hauteurs des postes (« *Et donc on va voir un peu cette zone-là ce que ça va faire en réalité virtuelle, voir bah s'il y a peut-être des choses à améliorer. Tiens ce truc-là il n'est peut-être pas assez haut* », préparateur 1).

Pour le préparateur 1, la réalité virtuelle pouvait permettre d'anticiper des problèmes dans la conception du poste (« *Je me suis dit ça c'est vraiment un bon moyen pour pouvoir anticiper les problèmes futurs* ») et de s'apercevoir de certains problèmes qui n'avaient pas été envisagés jusqu'alors (« *Tu pourrais anticiper, c'est beaucoup pour nous de l'anticipation, d'anticiper des choses que tu n'aurais pas vues ou pas pensées* »). Ses attentes concernaient ensuite les fonctionnalités offertes par le logiciel RHEA. Il souhaitait simuler des tâches avec les compagnons (« *Je pense que pour le compagnon ça va être très intéressant de voir, et nous aussi, de voir en fait on va lui dire bah voilà c'est comme si demain t'étais sur ton poste et tu vas nous simuler comment tu vas faire* »), et simuler l'éclairage du poste (« *J'avais même posé la question si on pouvait simuler la lumière [...] Pour voir s'il va pas y avoir des zones d'ombre.* »)

Le préparateur 2, quant à lui, a fait part d'attentes plus larges : il s'agissait pour lui de pouvoir naviguer à l'intérieur du poste (« *pouvoir naviguer dans l'environnement de travail* »), de pouvoir apporter des améliorations au poste (« *apporter une modification si on doit en apporter* ») et d'utiliser la réalité virtuelle comme aide à la rédaction des fiches techniques, qui guident l'assemblage pour la production (« *Et aussi nous aider pour la rédaction des fiches techniques.* »)

Nous avons également pu identifier des raisons qui ont amené les préparateurs à intégrer la réalité virtuelle. En effet, le préparateur 1 avait la volonté d'impliquer les compagnons (« *d'emmener vraiment les compagnons, de participer avec nous, qu'ils participent au projet* »). Son expérience antérieure avec cette technologie à Stelia a également motivé cette décision (« *L'idée de la réalité virtuelle m'est venue parce que je connaissais et j'avais déjà participé à cet outil-là.* »). Pour le préparateur 2 c'étaient davantage le coût du projet (« *Du coup c'est un des plus gros projets sur lesquels j'ai pu travailler [...] Et c'est la première fois que je travaille sur un projet qui justifie un peu l'utilisation de la réalité virtuelle.* ») et la nouveauté du processus (« *Et comme là ça va être des nouveaux bâtis, une nouvelle zone de travail, c'était parfait pour l'utilisation de la réalité virtuelle.* ») qui sont pointés.

4.2. Perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle

Nous avons également conduit une analyse thématique des entretiens ayant fait suite aux sessions en réalité virtuelle. Lors de cette analyse, nous avons construit cinq thématiques à partir du discours des personnes interviewées. Il s'agissait de l'utilité de la réalité virtuelle dans le projet de conception, de ses caractéristiques, de certains manques, de la comparaison de la réalité virtuelle avec d'autres outils, de la communication autour de la réalité virtuelle à Stelia et des intentions d'usage. Nous présenterons les principaux éléments relevés pour chacun de ces thèmes. La Figure 25 synthétise les résultats obtenus.

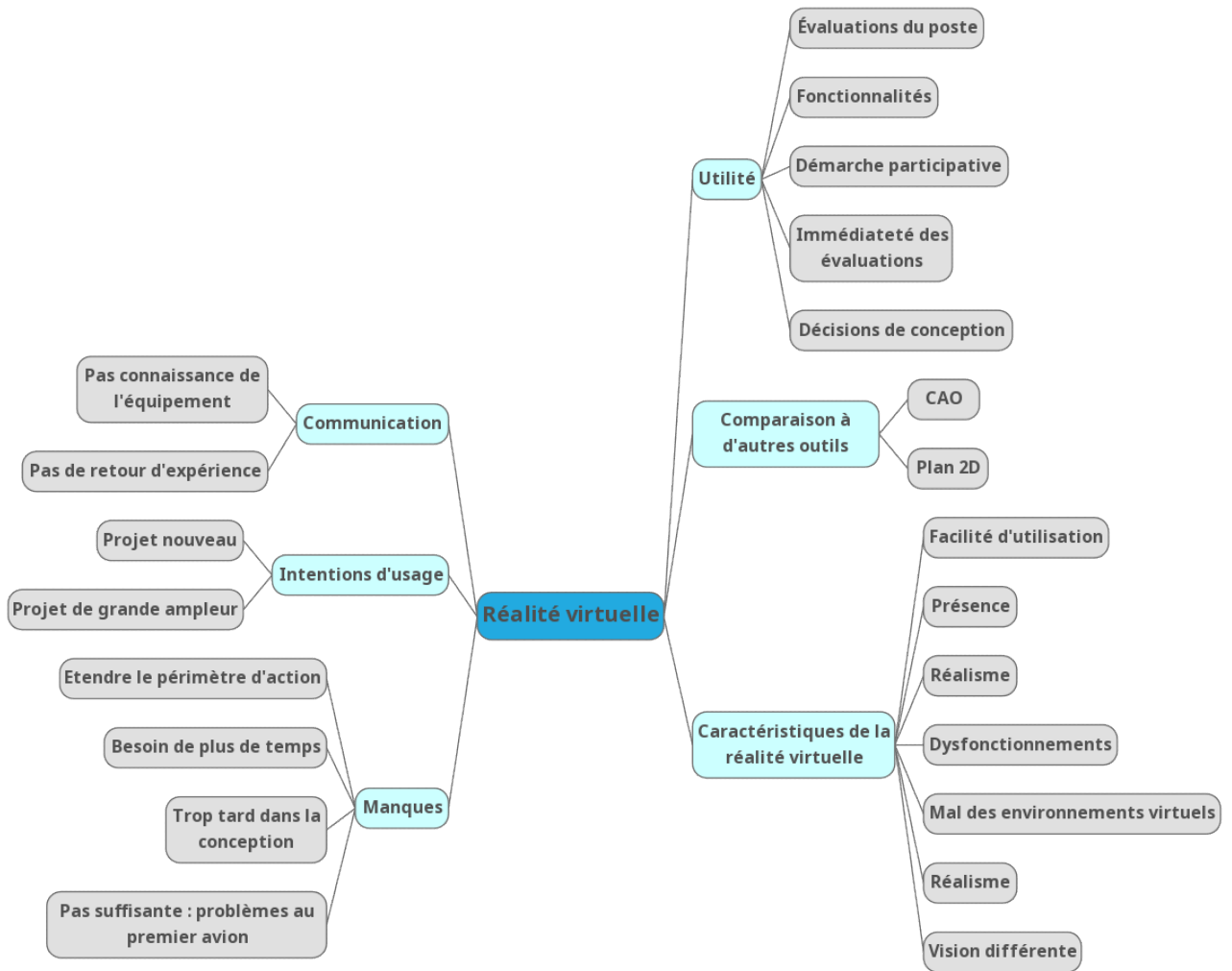


Figure 25. Synthèse des perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle

4.2.1. Utilité de la réalité virtuelle

Notre premier résultat concerne la perception de l'utilité de la réalité virtuelle. Nous avons pu identifier différents aspects qui, pour les utilisateurs, rendent la réalité virtuelle utile dans les projets de conception de poste. Cette thématique était la plus mentionnée par les interviewés avec 98 références. Premièrement, les trois utilisateurs interrogés ont rapporté des évaluations du poste qu'ils ont effectué à partir des sessions en réalité virtuelle. Il pouvait s'agir d'évaluations négatives (« *On a vu des accès très limités, par rapport aux armoires qu'on avait placées* », préparateur 1), entraînant une recherche de solutions, ou d'évaluations positives, validant une décision de conception (« *Bah après on a découvert grâce à ça que les postures étaient plutôt bonnes* », compagnon 2). À partir de ces évaluations, le préparateur 1 a évoqué différentes décisions qui ont ensuite été prises (« *Donc on a dit à la suite de ça il va falloir rebouger les armoires* », préparateur 1).

Par ailleurs, les utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle comme utile, car elle leur donne la possibilité d'adopter des démarches de conception participative, où les compagnons sont intégrés aux côtés des préparateurs (« *Ça implique aussi les compagnons en avance de phase* »). Le compagnon 2 a également rapporté que la

réalité virtuelle lui permettait une meilleure compréhension du projet (« *On peut en parler à plusieurs, en sachant tous exactement de quoi on parle sans le voir en direct* », compagnon 2).

Le jugement des utilisateurs sur l'utilité de la réalité virtuelle s'appuie sur ses fonctionnalités, par exemple, sur la visualisation du poste dans l'espace (« *C'est vrai que tu vois au sol l'emplacement que ça prend, l'emplacement que tu as pour travailler* », compagnon 1), sur la mesure des distances entre deux points (« *Je crois qu'on avait même mesuré en séance la distance [entre une armoire et le bâti]* », préparateur 1) ou encore sur la possibilité de tester l'accessibilité des outils dans une zone de travail (« *C'est ça qui était intéressant, c'est les accès surtout qui sont intéressants pour les machines* », compagnon 1).

L'utilité de la réalité virtuelle pour les utilisateurs repose également sur l'idée d'immédiateté : ils ont rapporté s'apercevoir d'un problème directement lors des sessions (« *On s'en rend compte directement* », compagnon 2 ; « *Ça je l'ai vu tout de suite avec la réalité virtuelle* », préparateur 1), alors qu'habituellement cela demande de passer par des études complémentaires ou par l'assemblage des premiers éléments avions.

4.2.2. Caractéristiques de la réalité virtuelle

Une autre des thématiques principales des entretiens (32 références) concerne les caractéristiques de la réalité virtuelle. Certaines sont perçues négativement. Les dysfonctionnements rencontrés lors de la capture d'angles articulaires sont mentionnés par les trois utilisateurs interrogés (« *Il y avait un bras à l'envers* », compagnon 2), et le mal des environnements virtuels est évoqué par le préparateur 1 et le compagnon 1 (« *On a vite fait la tête qui tourne quand même* », compagnon 1). Le préparateur 1 a également évoqué les erreurs de manipulation (« *Je sais qu'il y a un moment ils voulaient attraper l'outil et en fait c'était le bâti à chaque fois qu'ils attrapaient* »), et le compagnon 2 le décalage existant entre ce que percevait la personne qui portait les lunettes traquées et les utilisateurs qui se trouvaient autour d'elle (« *Quelques problèmes de vision parce qu'il n'y a qu'une personne qui a les lunettes* »).

À l'inverse, d'autres caractéristiques de la réalité virtuelle sont perçues positivement par les utilisateurs. Le compagnon 1 a mentionné le réalisme de l'environnement virtuel (« *Ça ressemble vraiment à ce qu'on avait vu* ») et le préparateur 1 le sentiment de présence ressenti (« *Après la réalité virtuelle te permet quand même de t'immerger vraiment dans le 3D en fait, dans l'espace* »). Ils ont perçu tous les deux la technologie comme facile d'utilisation (« *Bah c'est assez simple quand même* », préparateur 1).

4.2.3. Manques de la réalité virtuelle dans la revue de projet

Malgré l'utilité perçue de la réalité virtuelle, certains manques ont été pointés par les utilisateurs dans ces sessions (23 références). Ils reprochaient à ces sessions leur périmètre d'action restreint. Les deux compagnons auraient aimé simuler une opération au complet en utilisant plusieurs outils (« *Je pense qu'il faudrait vraiment simuler l'opération complète* », compagnon 1), alors que le préparateur 1 aurait aimé utiliser une maquette étendue du bâtiment pour pouvoir étudier les flux (« *Tu dois*

pouvoir, nous on l'a pas fait, mais je pense que tu dois pouvoir quand tu fais vraiment un bâtiment complet »).

Le compagnon 1 aurait également souhaité plus de temps afin de pouvoir évaluer le poste de manière plus complète (« *Quitte à passer, tant pis, une journée. Mais au moins que tout soit vraiment... qu'on soit sûrs, vraiment à cent pourcents.* »). Pour le compagnon 2, la réalité virtuelle intervenait trop tard dans le processus de conception (« *Oui. Bah oui pourquoi pas [utiliser à nouveau la réalité virtuelle]. Mais faut le faire avant* »). Par conséquent, il la jugeait inutile pour ce projet (« *Une belle démonstration de technologie quoi. Et un bon outil de communication. Voilà. Fin, rien de plus* »).

Enfin, le préparateur 1 concevait que l'utilisation de la réalité virtuelle n'était pas suffisante pour anticiper tous les problèmes, et que des améliorations seraient encore possibles lors de l'assemblage des premiers avions (« *Le projet n'est pas parfait puisqu'on va aussi s'apercevoir physiquement quand on fera l'avion qu'il y aura encore des petites améliorations à apporter* »).

4.2.4. Comparaison de la réalité virtuelle avec d'autres outils

La réalité virtuelle a été comparée à deux outils de travail utilisés habituellement par les concepteurs (18 références) : la conception assistée par ordinateur (CAO), c'est-à-dire des modèles 3D des postes qui sont construits et visualisés sous le logiciel CATIA®, et les plans en 2D. La comparaison avec la CAO était nuancée : d'une part, les utilisateurs ont pointé des avantages de la réalité virtuelle (« *Au niveau des accès, on est toujours un peu surpris. Oh mince ça passait puis là ça ne passe plus. Sur le PC ça passait puis là ça ne passe pas* », compagnon 1) et, d'autre part, ils ont rapporté des situations où elle n'avait pas d'avantages sur la CAO, et pour lesquelles ils la jugeaient donc inutile (« *En CAO si on l'avait vu que ça allait faire beaucoup de poteaux* », préparateur 1).

En comparaison avec les plans 2D, le préparateur 1 juge que la réalité virtuelle présente des avantages, car elle permet de s'apercevoir plus facilement des accès au poste (« *Tout passe. Sur un plan, il n'y a pas de souci. À la réalité virtuelle, fin moi ça m'a vraiment marqué qu'il y avait en fait très peu de place pour que le compagnon puisse tourner autour des bâtis* »).

4.2.5. Communication autour de la réalité virtuelle à Stelia

Les utilisateurs se sont également exprimés sur la communication autour de la réalité virtuelle dans l'entreprise (23 références). Nous notons que les personnes interrogées ont peu d'informations sur les technologies de réalité virtuelle de l'entreprise et sur leur utilisation. Le compagnon 2 n'avait ainsi pas connaissance que l'entreprise était équipée de ce type de technologies (« *Je découvre en même temps le matériel, j'aurais jamais cru qu'il y avait ça sur le site* »), et le compagnon 1 ne connaissait pas les possibilités offertes par ce type de technologies (« *Bah je savais qu'on allait, oui, tourner autour des postes et tout ça quoi. Mais je savais pas que les machines seraient modélisées et toutes les pièces à modéliser et tout ça. Je savais pas trop à quoi m'attendre* »).

De la même manière, bien qu'il avait connaissance que l'entreprise était équipée de dispositifs de réalité virtuelle, puisqu'il en avait utilisé dans le passé, le préparateur 1 n'avait pas connaissance d'autres projets ayant fait appel à cette technologie ou, en tout cas, il n'avait pas eu de retours d'expérience sur son utilisation

(« Mais sinon, j'ai pas connaissance d'autres projets [qui auraient intégré de la réalité virtuelle] »).

4.2.6. Intentions d'usage de la réalité virtuelle dans un projet de conception

Concernant les intentions d'utiliser à nouveau la réalité virtuelle (25 références), les compagnons ont déclaré qu'ils utiliseraient à nouveau si on leur proposait. Le préparateur 1 a indiqué deux critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception de poste. Le premier critère concerne la nouveauté du projet. En effet, ce préparateur n'en voyait pas l'utilité pour des duplications de poste par exemple (« *C'est vraiment quand tu implantes une nouvelle zone* »). Le deuxième critère concerne l'ampleur du projet ; le préparateur 1 trouvait pertinent d'avoir recours à la réalité virtuelle pour la conception d'une ligne entière de fabrication par exemple, mais pas pour un seul poste (« *Alors après ça dépend l'ampleur du projet. Pour un tout petit projet, faut voir. Mais là nous aujourd'hui on va révolutionner quand même une ligne entière* »).

Il considérait également qu'il fallait instaurer une obligation d'utiliser la réalité virtuelle pour la conception d'éléments nouveaux (« *Vraiment oui pour tout nouveau projet de, de nouveau bâti, de nouvelle implantation de ligne, toutes ces choses-là. De nouveaux bâtiments. Oui ça devrait être obligatoire. De passer par ça* »).

4.3. Usage réel de la réalité virtuelle pour la revue de projet

Les résultats recueillis nous ont également permis de caractériser l'usage réel de la réalité virtuelle. Nous présenterons des résultats sur le comportement des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle, sur les dysfonctionnements et les difficultés rencontrées par les utilisateurs et sur leurs communications lors de ces sessions.

4.3.1. Comportement des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle

Le codage des vidéos nous a permis d'établir comment était partagée la manette entre les utilisateurs lors des sessions. Lors de la première session, le préparateur 2 a tenu la manette pendant 1 h 06, soit 65 % du temps codé et le chargé de réalité virtuelle pendant 11 min 16, soit 11 % du temps codé.

Lors de la seconde session, la manette a été partagée entre le préparateur 2, le chargé de réalité virtuelle et le compagnon 2. Là encore, le préparateur 2 en a été l'utilisateur principal puisqu'il l'a tenu pendant 1h24, ce qui représente 73 % du temps codé. Le compagnon 2 l'a gardé 30 min 25, soit 26 % du temps codé. Le chargé de réalité virtuelle a eu la manette pendant 9 s, ce qui représente moins de 1 % du temps.

Nous nous sommes surtout intéressée aux fonctionnalités utilisées lors de ces sessions en réalité virtuelle. Pour la première session en réalité virtuelle, quatre fonctionnalités ont été majoritairement utilisées : les déplacements dans l'environnement virtuel, la saisie d'objets, la capture d'angles articulaires et la navigation dans les menus. La Figure 26 synthétise les différentes fonctionnalités utilisées.

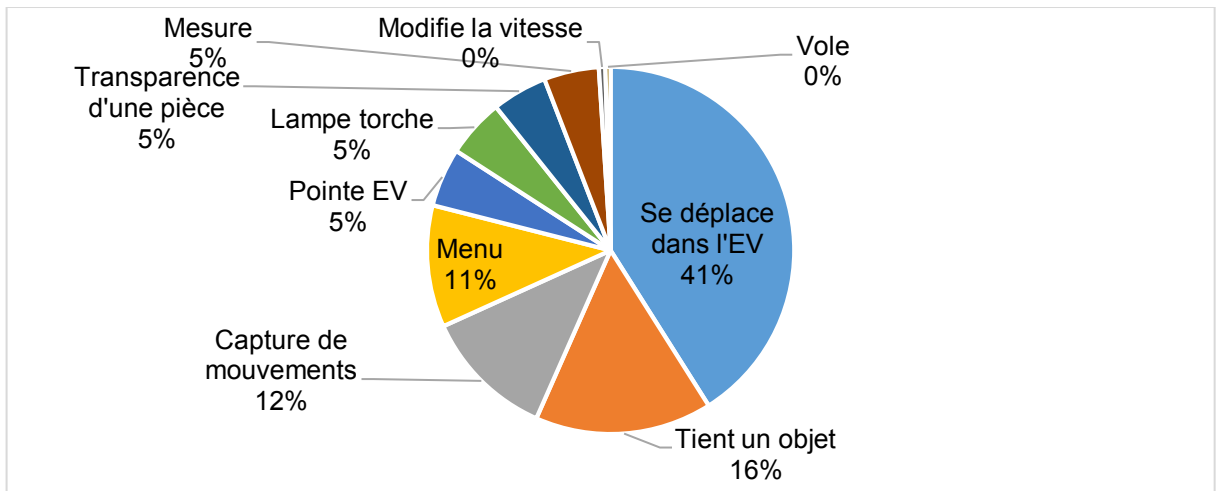


Figure 26. Fonctionnalités utilisées lors de la première session en RV¹⁵

Pour la seconde session, quatre fonctionnalités ont été majoritairement utilisées : les déplacements, la capture d'angles articulaires, la saisie d'objets et les pointages à l'aide d'un laser dans l'environnement virtuel. La Figure 27 résume les fonctionnalités utilisées lors de la seconde session en réalité virtuelle.

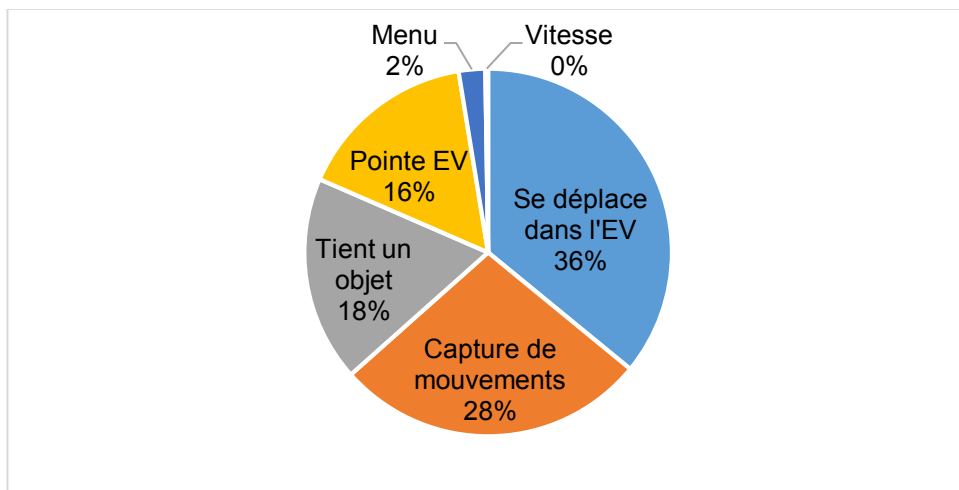


Figure 27. Fonctionnalités utilisées lors de la seconde session en RV

4.3.2. Dysfonctionnements et difficultés de manipulation

Les dysfonctionnements et les difficultés de manipulation lors des sessions nous informent sur l'acceptabilité pratique de la réalité virtuelle, et plus particulièrement sur son utilisabilité. Nous avons relevé 10 dysfonctionnements lors de la première session en réalité virtuelle, et six lors de la seconde. Par exemple, les utilisateurs avaient rencontré des problèmes avec les lunettes qui n'offraient pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel, ou encore un fort ralentissement du CAVE qui les a obligés à le redémarrer complètement. Le Tableau 9 synthétise ces dysfonctionnements.

¹⁵ Dans les figures, la proportion de temps d'utilisation est égale à 0 % pour certaines fonctionnalités ; elles ont bien été utilisées, mais pour des durées très faibles qui n'équivalent pas à 1 % de la durée totale du codage. Pour cette raison, les figures indiquent 0 %.

Tableau 9. *Dysfonctionnements relevés lors des deux sessions en réalité virtuelle*

Session	Description du dysfonctionnement
Session 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lunettes qui ne permettent pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel 2. Objet que le préparateur 2 essaie de saisir disparaît 3. Perceuse qui revient à sa place initiale 4. Ralentissement du CAVE : décalage temporel des mouvements entre la main de l'utilisateur et l'avatar dans l'environnement virtuel 5. Les utilisateurs cherchent à mettre une pièce en transparence, mais le sous-ensemble au complet se met en transparence 6. Le préparateur 2 essaie de reposer le bâti, sans succès 7. Le sous-ensemble complet est transparent + ralentissement du CAVE 8. Environnement virtuel vu en hauteur + les utilisateurs ne peuvent pas se déplacer (ni avec la manette ni en marchant dans le CAVE) 9. Environnement virtuel entièrement bleu 10. Lunettes qui ne permettent pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel
Session 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Les utilisateurs sont surélevés 2. Les utilisateurs ne parviennent pas à déplacer l'avatar en avant 3. Capture d'angles articulaires erronée 4. Perceuse tombe spontanément au sol 5. Bâti qui ne repose pas sur le sol 6. Lunettes qui ne permettent pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel

Nous avons également pu mettre en évidence quatre passages indiquant des difficultés de manipulation lors des sessions : trois lors de la première et deux lors de la seconde. Par exemple, le préparateur 2 a essayé à 18 reprises de saisir une perceuse tombée au sol et a été aidé par le chargé de réalité virtuelle. Le Tableau 10 reprend ces difficultés de manipulation lors des sessions.

Tableau 10. *Difficultés de manipulation relevées lors des deux sessions en réalité virtuelle*

Session	Description de la difficulté de manipulation
Session 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. 7 essais pour saisir un objet 2. 18 essais pour saisir un objet tombé au sol, aidé par le chargé de réalité virtuelle qui déphysicalise l'objet 3. Attrape le sous-ensemble complet au lieu de l'UPA
Session 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. 3 essais pour saisir un objet

4.3.3. Communications lors des sessions en réalité virtuelle

Avec l'analyse menée sur les communications lors des sessions en réalité virtuelle, nous pouvons :

- caractériser le type de communications lors des sessions (*Qu'est-ce qui se dit ?*) ;
- connaître la répartition des communications entre les utilisateurs (*Qui parle ?*) ;
- déterminer la répartition des communications pour un même utilisateur (*Pour dire quoi ?*)

Pour commencer, rappelons qu'avec Nvivo nous avons attribué différents segments des transcriptions à différents codes. Nous avons ensuite regroupé les codes en différentes catégories de communications. Nvivo permet ensuite de calculer le nombre de segments par catégories. Il est toutefois à noter que le logiciel n'intègre qu'une seule fois le segment à une catégorie. Pour cette raison, le nombre de références total varie entre les analyses qui se centrent sur les catégories générales et celles qui se centrent sur les codes. Par exemple, la citation « Pour mieux voir je vais me mettre de l'autre côté » appartient à la fois au code Annonce d'une action et au code Point de vue. En se focalisant sur les catégories générales, elle ne sera comptée qu'une fois par le logiciel (dans Utilisation de la réalité virtuelle), alors que si on procède à un décompte par codes elle sera comptée dans ces deux catégories.

La Figure 28 résume le nombre de références par catégorie et leurs proportions par rapport au nombre de références total. La catégorie « Revue de projet » est la plus représentée de l'ensemble des communications lors des deux sessions en réalité virtuelle. Elle représente 52 % du corpus. Viennent ensuite les communications relatives à l'utilisation de la réalité virtuelle qui équivalent à 27 % du corpus.

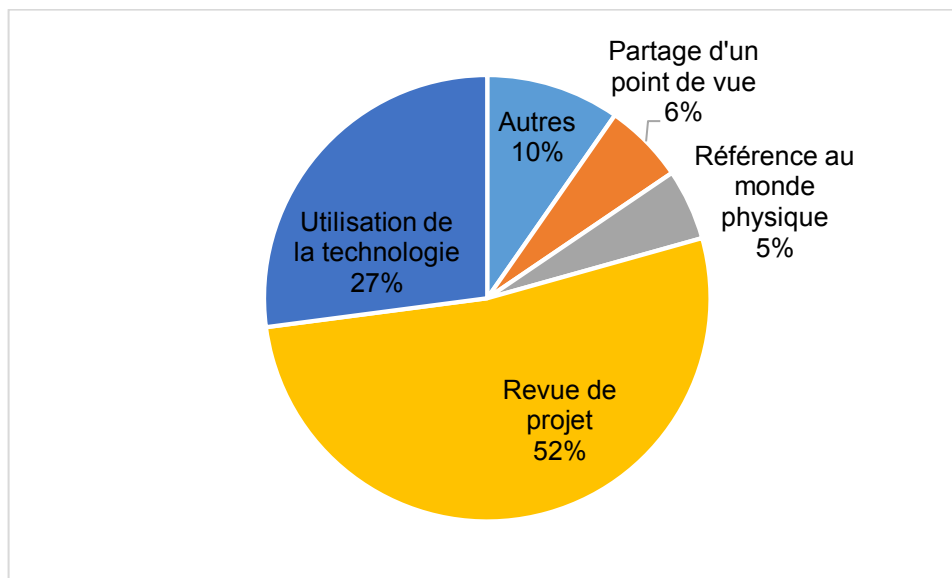


Figure 28. Répartition des catégories de communications lors des deux sessions

Cette répartition des catégories de communication variait entre les deux sessions observées. Pour la première session, les communications relatives à l'utilisation de la technologie étaient les plus nombreuses, suivies des communications relatives à la revue de projet (Figure 29), alors que pour la seconde session, nous observions un résultat inverse : c'étaient les communications concernant la revue de

projet qui prédominaient et venaient ensuite les communications sur l'utilisation de la réalité virtuelle (Figure 30).

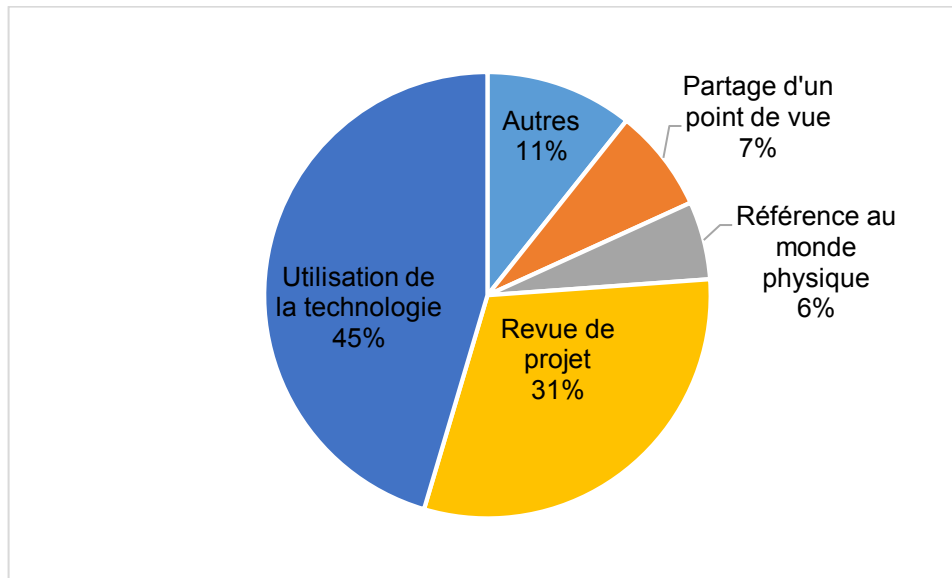


Figure 29. Répartition des catégories de communications pour la session 1

Les autres catégories étaient peu représentées, elles atteignaient moins de 10 % du corpus. Il est à noter que la catégorie « Autres » occupait une part plus importante que les catégories « Référence au monde physique » et « Partage d'un point de vue ». Cette importance s'explique par la construction de cette catégorie puisque dans le code « Annonce d'une action », les références étaient nombreuses.

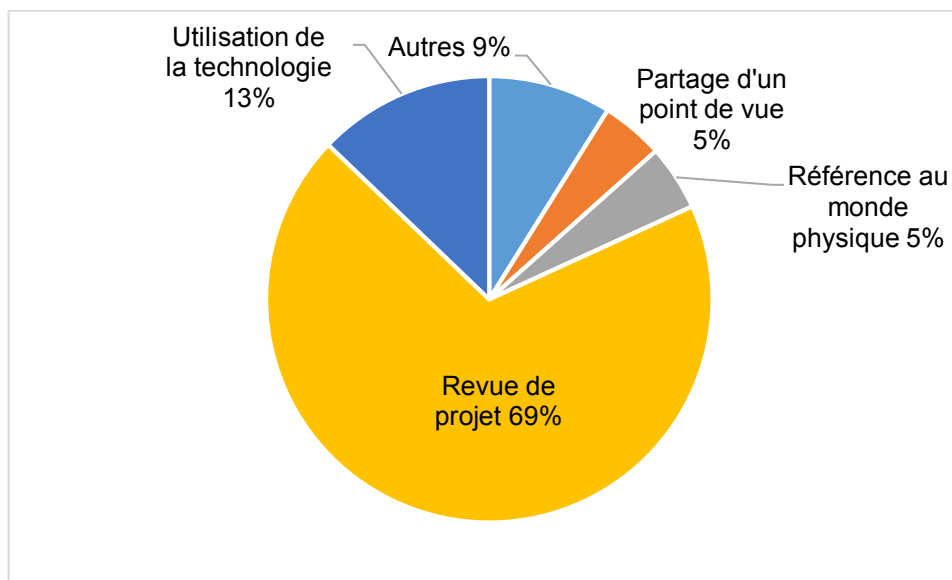


Figure 30. Répartition des catégories de communications pour la session 2

Pour plus de détails sur le contenu des communications, nous nous sommes également intéressée au niveau inférieur du codage et nous avons comptabilisé les références par codes. Pour illustrer la répartition des communications entre les codes, nous donnerons ici les trois codes les plus représentés.

Lorsque nous analysons les références totales des deux sessions, les codes les plus représentés sont les explications de la future tâche (348 références, 22 %),

les questions sur la future tâche (159 références, 10 %) et les évaluations du poste (130 références, 8 %). Pour la première session, les injonctions (76 références, 11 %), les évaluations du poste (67 références, 10 %) et les explications de la future tâche (56 références, 8 %) étaient majoritaires. Pour la seconde session, les catégories les plus représentées étaient les explications sur la future tâche (292 références, 33 %), les questions sur la future tâche (134 références, 15 %) et les annonces d'une action (68 références, 8 %).

Le deuxième résultat de nos analyses concerne la répartition des références codées entre les utilisateurs. Lorsque les références des deux sessions en réalité virtuelle sont prises en compte, nous identifions que les trois utilisateurs qui se sont le plus exprimés sont le préparateur 2 (49 % du corpus avec 763 références), le chargé de réalité virtuelle (18 %, 272 références) et le préparateur 1 (10 %, 151 références). Pour la première session, les utilisateurs s'étant le plus exprimés étaient, respectivement, le préparateur 2 (45 %, 298 références), le chargé de réalité virtuelle (216 références, 32 %) et le préparateur 1 (15 %, 100 références). Pour la seconde session, les deux utilisateurs s'étant le plus exprimés étaient le préparateur 2 (53 % du corpus avec 465 références) et le compagnon 1 (14 %, 124 références).

Nous nous sommes ensuite intéressée à la répartition des communications pour les utilisateurs qui s'exprimaient majoritairement lors des sessions, c'est-à-dire pour le préparateur 2, le chargé de réalité virtuelle, le préparateur 1 et le compagnon 1. D'abord, pour l'ensemble des sessions, le préparateur 2 s'est exprimé majoritairement sur la future tâche (36 %, 271 références) et il a annoncé les actions qu'il allait effectuer (13 %, 97 références). Les communications sur la future tâche étaient accompagnées de références à l'environnement virtuel (22 %, 210 références). Les communications du chargé de réalité virtuelle étaient en premier lieu des injonctions (76, soit 28 %), suivies d'instructions pour réaliser une manipulation (44, soit 16 %) ainsi que d'explications générales sur la réalité virtuelle ou sur une fonctionnalité en particulier (41, soit 15 %). Le préparateur 1 a majoritairement évalué le poste (21 %, soit 32 références), s'est exprimé sur la future tâche (16 %, 24 références) et a énoncé des injonctions (16, soit 11 %).

Nous avons ensuite analysé les communications en fonction des sessions. Nous n'avons pas observé de différences dans les communications qui prédominaient pour le préparateur 2 : lors des deux sessions, il a majoritairement évoqué la future tâche (18 % et 53 références pour la session 1 ; 47 % et 218 références pour la session 2) et annoncé ses actions (31 références soit 10 % pour la session 1 ; 66 références soit 14 % pour la session 2). En revanche, nous avons relevé des différences dans la répartition des communications du chargé de réalité virtuelle entre les deux sessions. Pour la première session, c'étaient les injonctions (43, soit 20 %), les instructions (43, soit 20 %) et les explications (38, soit 18 %) qui primaient, alors que pour la seconde session, c'étaient majoritairement les injonctions (33, soit 59 %). Les explications des difficultés de manipulation (8, 14%) émergeaient par ailleurs. Nous avons également noté des différences entre les deux sessions pour le préparateur 1. Pour la première session, ce sont les évaluations du poste (27, soit 27 %) et les injonctions (15, soit 15 %) que nous avons relevé en premier lieu, alors que pour la seconde session, nous avons relevé des explications de la future tâche (23, soit 45 %) et des explications des contraintes de conception (7, soit 14 %). Enfin, pour le compagnon 1, qui a participé uniquement à la session 2, les références que nous avons relevées étaient très majoritairement des questions sur la future tâche (80 références, soit 65 % de ses interventions).

Comme nous l'expliquions précédemment, nous avons traité le code Références à l'environnement virtuel séparément des autres résultats. Lorsque les résultats des deux sessions ont été fusionnés, nous avons mis en évidence que les références à l'environnement virtuel étaient le plus fréquemment combinées aux explications sur la future tâche (122 références, soit 56 %).

5. DISCUSSION

Cette étude portait sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans un projet de conception de postes d'assemblage d'éléments avion. Elle répondait à deux objectifs. Le premier était de comprendre comment les utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle, ainsi que leurs intentions (ou non) de l'utiliser. Le second était d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'usage réel de la technologie.

Avant de discuter de nos résultats en fonction de ces objectifs, nous commencerons par décrire le déroulement général de ces deux sessions. En effet, les résultats obtenus sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans ce projet sont à considérer en regard de ces éléments de contexte.

5.1. Deux sessions qui se distinguent par leurs utilisateurs et leur contenu

Dans cette étude, la réalité virtuelle a été intégrée lors d'une phase tardive du projet : le process de fabrication, les postes d'assemblage et l'implantation des éléments constitutifs de l'environnement du poste (armoires pour les outils, poubelles, etc.) étaient donc déjà définis.

Il faut également noter que les deux sessions se distinguaient à la fois par les utilisateurs qu'elles mobilisaient, mais aussi par le contenu de leurs communications et par l'utilisation qu'ils faisaient de la réalité virtuelle. La première session a impliqué, en plus du chargé de réalité virtuelle, cinq utilisateurs qui étaient tous préparateurs aéronautiques. Elle s'est articulée autour de trois activités principales. La première était la familiarisation des préparateurs avec la réalité virtuelle. En effet, nous avons relevé que les communications des utilisateurs lors de cette première session concernaient majoritairement la technologie. Il s'agissait pour eux de comprendre les fonctionnalités du logiciel RHEA et d'apprendre à les utiliser. Les communications du chargé de réalité virtuelle lors de cette session témoignent également de cette activité, puisqu'elles se composent principalement d'injonctions, d'instructions pour effectuer des manipulations et d'explications sur la technologie. La seconde activité que nous avons identifiée lors de cette session est la visite des postes d'assemblage et l'explication du process. Nous avons repéré cette activité par différents indicateurs : les déplacements nombreux dans l'environnement virtuel, ainsi que des explications sur la future tâche qui s'appuyaient sur des références à l'environnement virtuel (les utilisateurs pouvaient par exemple pointer un chariot de manutention en expliquant comment il allait être utilisé). Enfin, cette première session a également été l'occasion pour les utilisateurs de juger les postes qu'ils avaient conçus. Nous avons identifié cette activité par une proportion importante d'évaluations dans leurs communications.

Lors de cette session, la manette a été partagée entre le préparateur 2 (65 % de la durée de la session) et le chargé de réalité virtuelle (11 % de la session). Les fonctionnalités les plus utilisées dans cette session ont été les déplacements dans l'environnement virtuel, la saisie d'objet, la capture d'angles articulaires et la navigation dans les menus.

La seconde session en réalité virtuelle a impliqué, en plus du chargé de réalité virtuelle et des deux préparateurs en charge du projet, dix autres utilisateurs. Ces utilisateurs occupaient différents postes (compagnon, animateur qualité, chef de ligne, préparateur...). À la différence de la première session, celle-ci s'est majoritairement articulée autour de la visite du poste et de l'explication du process par le préparateur 2. Là aussi, nous avons pointé ces activités à l'aide des déplacements dans l'environnement virtuel et des explications sur la tâche, que le préparateur accompagnait de références à l'environnement virtuel. Nous avons également noté une proportion importante de questions sur la future tâche (12 % des communications), notamment par les compagnons.

Par ailleurs, le partage de la manette témoigne d'une autonomie des utilisateurs et d'une prise de distance par le chargé de réalité virtuelle entre la première et la seconde session. Dans la seconde, la manette a majoritairement été partagée entre le préparateur 2 et le compagnon 2, le chargé de réalité virtuelle étant uniquement intervenu succinctement.

Le contenu des communications témoigne également d'un changement de rôle du chargé de réalité virtuelle dans cette session. Alors que dans la première session, il s'est exprimé par des injonctions, des instructions pour les manipulations et des explications sur la réalité virtuelle ; lors de la seconde, il est surtout intervenu lorsque les utilisateurs requéraient de l'aide, et ce, par des injonctions, ou, à d'autres moments, en leur expliquant certains dysfonctionnements. Nous pensons donc qu'il est passé d'un rôle d'accompagnant, voire de formateur, dans la première session à un rôle de support dans la seconde. La répartition des communications entre les participants lors des sessions illustre également ce changement : alors qu'il était l'une des personnes s'exprimant le plus dans la première, il s'est moins exprimé dans cette seconde session, faisant du préparateur 2, du préparateur 1 et du compagnon 1 les personnes s'étant le plus exprimées.

5.2. Discussion des principaux résultats : facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie

Dans cette étude, nous avons identifié des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans le cadre d'un projet de conception. Nous avons relevé ces facteurs à la fois dans les perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle et dans l'usage qu'ils ont fait de la technologie. Le Tableau 11 synthétise nos résultats. Nous commencerons par les perceptions des utilisateurs, puis, nous nous arrêterons sur l'interaction des utilisateurs avec la technologie et son intégration à l'activité de conception.

Tableau 11. *Facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle identifiés dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie*

	Facteurs d'acceptation	Facteurs de rejet
Perceptions des utilisateurs	Utilité Avantages face à CAO et plan 2D Caractéristiques de la réalité virtuelle : facilité d'utilisation, réalisme, présence Caractéristiques des projets : nouveaux et de grande ampleur	Manques Inutilité face à la CAO Caractéristiques de la réalité virtuelle : dysfonctionnements et erreurs de manipulation, mal des environnements virtuels, décalage de point de vue Caractéristiques des projets : duplication de postes existants Communication à Stelia (pas facteur de <u>rejet</u> , mais de non-utilisation, voir cadre théorique)
Usage	Utilité objective : activité de conception avec réalité virtuelle Accompagnement par le chargé de réalité virtuelle	Dysfonctionnements et difficultés de manipulation

5.2.1. Facteurs d'acceptation identifiés dans les perceptions des utilisateurs : utilité perçue et caractéristiques de la technologie jugées positivement

Premièrement, les utilisateurs interrogés jugeaient la réalité virtuelle utile sur différents aspects dans ce projet, ce qui nous amène à poser l'utilité perçue de la réalité virtuelle comme un facteur d'acceptation. Ils ont d'abord pointé qu'elle leur permet d'évaluer le poste, à l'aide des différentes fonctionnalités qu'elle offre. De plus, elle permet de pouvoir faire certaines de ces évaluations immédiatement pendant les sessions, sans études supplémentaires. Elle facilite également l'inclusion des compagnons dans les projets, et elle leur permet de comprendre aisément le process, la configuration des postes et les tâches qu'ils auront à réaliser. Enfin, elle permet aux préparateurs de prendre des décisions de conception à partir des évaluations faites pendant les sessions. Ces différents aspects sur lesquels les utilisateurs jugeaient la réalité virtuelle utile renvoient à son utilité-destination, c'est-à-dire aux fonctionnalités qu'elle offre (navigation dans un environnement virtuel, prise de mesure, détection de collisions) et à ses utilisations possibles (visite du poste, évaluations, explications des futures tâches) (Loup-Escande et al., 2013).

Cette catégorie, l'utilité perçue de la réalité virtuelle, est celle pour laquelle nous avons relevé le plus de références, ce qui suggère qu'elle a une place importante dans les perceptions des utilisateurs. Ces résultats sont en accord avec la littérature, qui identifie l'utilité perçue comme une variable majeure dans l'acceptabilité sociale des technologies (Davis, 1989; King & He, 2006; Y. Lee et al., 2003). Ce rôle de l'utilité

perçue a également été montré pour les environnements virtuels (e.g., Bertrand & Bouchard, 2008; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Isler, 2013).

Un autre facteur d'acceptation identifié par les perceptions des utilisateurs concerne les avantages de la réalité virtuelle sur la CAO et les plans 2D, qui sont les outils habituellement utilisés par les préparateurs. En effet, pour les utilisateurs, la réalité virtuelle permet de détecter des problèmes d'accessibilité des zones de travail, qui ne sont pas nécessairement identifiables avec les plans 2D ou avec les maquettes en CAO. C'est ici l'utilité-valeur de la réalité virtuelle qui est à considérer comme un facteur d'acceptation, c'est-à-dire les avantages qu'elle présente par rapport à d'autres outils (Loup-Escande et al., 2013). Ces avantages sont toutefois à nuancer, car les utilisateurs ont souligné que certains des logiciels de CAO qu'ils utilisaient avaient des fonctionnalités similaires à celles de la réalité virtuelle. Par exemple, le logiciel CATIA® leur permet, tout comme la réalité virtuelle, de détecter des collisions entre un outil et des éléments de la structure du bâti.

Les résultats sur l'utilité-destination et sur l'utilité-valeur de la réalité virtuelle que nous avons obtenus grâce aux entretiens diffèrent dans leur contenu des résultats qui peuvent être obtenus par les questionnaires d'acceptabilité. En effet, les questionnaires informent du degré d'utilité perçue par les utilisateurs, sans nécessairement en expliquer les raisons. Par ailleurs, ils évaluent sous la même dimension l'utilité-destination et l'utilité-valeur d'une technologie. Par exemple, l'échelle d'évaluation de l'utilité perçue de Davis (1989) comprend des items comme « *Je trouve que [telle technologie] serait utile dans mon travail* », qui renvoie à l'utilité-destination de la technologie, et des items comme « *Je pense qu'utiliser [telle technologie] améliorerait mes performances au travail* », qui renvoie à son utilité-valeur.

En plus de l'utilité perçue, certaines caractéristiques des projets de conception peuvent amener les utilisateurs à utiliser la réalité virtuelle. Pour le préparateur 1, il faut que le projet soit nouveau (c'est-à-dire que le poste n'existe pas sur le site) et qu'il soit de grande ampleur (par sa taille ou par son coût). Ce résultat renvoie à l'idée d'une décision s'appuyant sur une analyse coût-bénéfice de l'intégration de la réalité virtuelle à un projet. Cela suggère que les coûts de l'utilisation de la réalité virtuelle (en termes de définition de scénarios, d'organisation pour la réservation du CAVE, de personnes devant se rendre disponibles, de temps investi, de budget...) sont comparés aux bénéfices qu'elle pourrait apporter en termes, par exemple, de gain de temps de conception ou de production, d'amélioration des conditions de travail, de gains financiers ou encore de diminution de problèmes de qualité. Si l'équipe juge le coût trop important pour les bénéfices escomptés, elle pourrait s'en passer et opter pour d'autres méthodes jugées moins coûteuses, comme la CAO ou le retour d'expérience sur un poste existant.

Certaines perceptions positives des utilisateurs sur les caractéristiques de la réalité virtuelle peuvent être également considérées comme des facteurs d'acceptation dans ce projet. D'abord, les utilisateurs ont jugé la réalité virtuelle facile d'utilisation. Néanmoins, le fait que la facilité d'utilisation ait été peu discutée en entretien suggère qu'elle occupe une place secondaire dans les perceptions des utilisateurs. Ce résultat est contraire aux études sur l'acceptabilité sociale de la réalité virtuelle qui la place fréquemment comme une variable centrale dans la prédiction des intentions d'usage (Legris, Ingham, & Collerette, 2003; Yousafzai et al., 2007a), aux côtés de l'utilité perçue. Nous pouvons avancer plusieurs raisons pour expliquer que

la facilité d'utilisation perçue prend peu d'importance dans cette étude. Premièrement, parmi les trois utilisateurs interrogés, un seul a effectivement manipulé la technologie, alors que les autres ont simplement observé l'environnement virtuel à l'intérieur du CAVE. Il s'agissait du compagnon 2, dont nous avons précisé l'expérience antérieure avec les technologies de réalité virtuelle. Nous pouvons donc penser que cet utilisateur est habitué à utiliser une manette pour se déplacer dans un environnement virtuel, et que la facilité d'utilisation de la technologie a peu d'importance pour lui. Des études antérieures montrent d'ailleurs la diminution de l'importance de la facilité d'utilisation perçue dans l'acceptabilité au fur et à mesure des usages, et donc pour les utilisateurs expérimentés (Davis, 1989; Venkatesh & Bala, 2008). Par ailleurs, nous pensons que le préparateur 1 et le compagnon 1, qui eux n'avaient pas directement manipulé la technologie, pouvaient difficilement juger de sa facilité d'utilisation. Nous pouvons également expliquer ce résultat par le rôle du chargé de réalité virtuelle dans ces sessions. En effet, les utilisateurs ont été guidés lors des sessions par le chargé de réalité virtuelle qui leur indiquait comment utiliser le CAVE et le logiciel RHEA. Nous pensons donc que, là aussi, il peut être difficile pour les utilisateurs interrogés de commenter la facilité d'utilisation de la réalité virtuelle. Il faut signaler que le préparateur 2 aurait pu apporter des éclairages sur cette question, puisqu'il est le seul utilisateur à avoir utilisé la technologie en autonomie, et sans avoir d'expérience antérieure avec la réalité virtuelle.

Deux autres caractéristiques de la réalité virtuelle ont également été perçues positivement. Il s'agit du réalisme de l'environnement virtuel et du sentiment de présence ressenti par les utilisateurs. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures qui montrent des effets significatifs de la qualité du contenu de l'environnement virtuel (Hou et al., 2019) et de la présence (Hou et al., 2019; Shin et al., 2013) sur l'acceptabilité sociale de la réalité virtuelle et des environnements virtuels.

5.2.2. Facteurs de rejet identifiés dans les perceptions des utilisateurs : manques, caractéristiques de la technologie jugées négativement et manque de communication

L'analyse des perceptions des utilisateurs nous a également permis d'identifier des facteurs de rejet de la réalité virtuelle. Le premier renvoie aux manques que les utilisateurs ont rapportés dans les sessions conduites. Le périmètre d'action restreint des sessions en est un. Pour les compagnons, il aurait fallu pouvoir simuler des opérations complètes ; et, pour le préparateur 1, il aurait été intéressant de modéliser le bâtiment au complet pour étudier les flux. Le compagnon 1 aurait également préféré un travail en réalité virtuelle plus long, qui aurait permis d'évaluer le poste de manière plus complète. Ces trois besoins renvoient à des changements dans la nature des sessions. En effet, dans les sessions observées, l'environnement virtuel était statique et ne permettait pas de simulation de l'activité à proprement parler. Ces manques identifiés indiquent un besoin de conduire de réelles simulations des opérations, et d'y inclure autour du poste un environnement dynamique qui permettrait d'anticiper les problèmes relatifs aux flux des pièces avion, afin de pouvoir identifier des problèmes de conception. Deux simulations sont possibles : des simulations expérimentales et des simulations langagières (Béguin, 2004; Daniellou, 2004, 2007). Lors d'une simulation expérimentale, le compagnon réaliserait effectivement un scénario et son activité serait analysée afin d'identifier les problèmes rencontrés et d'en tirer des solutions de conception. La simulation langagière repose sur le même principe, mais

au lieu de la réalisation d'une tâche en réalité virtuelle, on s'appuierait sur le récit d'un mode opératoire par le compagnon.

Un autre manque dans les sessions provient du compagnon 2. Pour lui, la réalité virtuelle intervenait trop tard dans le process de conception, et il la jugeait donc inutile. Il savait que les problèmes pointés et les solutions proposées lors des sessions seraient difficilement pris en compte, au vu de l'avancée du projet. Le préparateur 2 l'a également souligné lors de la session : lorsque le compagnon 1 a demandé s'il était trop tard pour proposer un rail coulissant pour poser les tuyaux en hauteur, il lui a répondu : « *Alors... pour les premiers temps, oui. Il est trop tard. Par contre, en amélioration, ça on peut l'envisager* ». Ce constat renvoie à des problèmes bien connus des ergonomes qui interviennent en fin de projet de conception : nous savons que la temporalité des situations de conception est paradoxale, c'est-à-dire que plus le produit est défini, plus les marges de manœuvre des concepteurs se restreignent (Midler, 1996). Dans cette étude, le futur poste était précisément défini, ce qui laissait peu de marges de manœuvre lors des sessions en réalité virtuelle pour proposer des modifications, d'autant plus si elles étaient importantes. L'intégration de la réalité virtuelle plus tôt dans le projet aurait permis aux participants d'avoir plus de marges de manœuvre pour pointer des problèmes et proposer des solutions.

Ce constat nous amène à nous interroger sur le rôle des compagnons dans ce projet de conception. Plusieurs rôles auraient pu leur être donnés dans ces réunions, qu'elles aient lieu avec ou sans réalité virtuelle : celui de co-concepteurs, qui font avancer la conception et proposeraient des solutions ; celui d'évaluateurs des solutions pensées par les préparateurs ; ou celui de futurs utilisateurs que les préparateurs informent sur la conception du poste et sur les futures tâches à réaliser (Cahour, 2002). Nos observations suggèrent qu'ils ont majoritairement joué le rôle de futurs utilisateurs, puisqu'une proportion importante des communications consistaient en des explications sur le poste par les préparateurs. Nous pouvons penser que s'ils avaient tenu un rôle d'évaluateurs, voire de co-concepteurs, ils auraient jugé la réalité virtuelle et leur participation plus utiles.

Un autre des manques que nous pointons concerne l'efficacité des sessions en réalité virtuelle. Pour le préparateur 1, la réalité virtuelle n'est pas suffisante et il considère que d'autres problèmes de conception seraient identifiés lors de l'assemblage des premiers avions. Ce constat renvoie à l'impossibilité de prédire de manière certaine les problèmes qui seront rencontrés, ce dont les concepteurs ont conscience.

De la même manière que certaines caractéristiques de la réalité virtuelle étaient perçues positivement par les utilisateurs, certaines étaient perçues négativement et sont à considérer comme des facteurs de rejet. Il s'agit des dysfonctionnements et des erreurs de manipulation rencontrés lors des sessions, ainsi que du mal des environnements virtuels. Les premiers ont été mentionnés par l'ensemble des utilisateurs, notamment pour la capture d'angles articulaires. Nous en avons identifié d'autres lors des observations des sessions, qui ne sont toutefois pas mentionnés par les utilisateurs. Nous pensons que ce dysfonctionnement a pris une importance plus importante que les autres pour les utilisateurs, car l'évaluation des postures de travail, sans la présence de l'ergonome du site lors de la session, reposait uniquement sur les informations données par le logiciel. En effet, RHEA permet d'effectuer des évaluations ergonomiques des postures de travail en calculant des angles articulaires et en se basant sur les grilles RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*) (McAtamney &

Nigel Corlett, 1993). La position de l'utilisateur portant des capteurs est reportée sur un écran et différentes couleurs indiquent si la posture présente un risque négligeable (affiché en vert sur le CAVE), élevé (orange) ou très élevé (rouge). D'autres évaluations, comme la largeur d'une allée de passage, reposaient sur la simple appréhension des utilisateurs, sans l'utilisation d'une autre fonctionnalité du logiciel, mise à part la visualisation de l'environnement virtuel. Le calcul des angles articulaires a ainsi été marquant pour les utilisateurs, car il montre des défauts de fiabilité des informations qui peuvent être données par RHEA.

Des symptômes de mal des environnements virtuels sont également rapportés par les utilisateurs. Le mal des environnements virtuels est considéré comme un facteur pouvant freiner la diffusion de la réalité virtuelle (Frank Biocca, 1992) et faire renoncer les individus à une nouvelle utilisation (Frank Biocca et al., 2001; Diels & Howarth, 2013; Lin & Parker, 2007). Il est ici mentionné par le compagnon 1 et le préparateur 1, qui ont été passifs dans l'environnement virtuel : ils ont simplement été immergés dans l'environnement virtuel sans le contrôler. La passivité en réalité virtuelle est connue pour être un facteur favorisant le mal des environnements virtuels (Sharples et al., 2008). Toutefois, il était possible pour eux de sortir du CAVE, sans toutefois perturber le déroulement de la session et en pouvant toujours participer aux échanges. Le préparateur 1 est ainsi sorti à plusieurs reprises, tout en étant un des utilisateurs s'étant le plus exprimés sur le poste (« *Moi il y a un moment je suis sorti, parce que j'étais vraiment dans la zone. De temps en temps, je ressortais* »). Nous nous questionnons alors sur le poids du mal des environnements virtuels comme un facteur de rejet. Il est effectivement perçu négativement par les utilisateurs, toutefois il ne semble pas avoir freiné la participation à la session en réalité virtuelle. L'effet du mal des environnements virtuels n'est pas constant dans les études empiriques. On lui trouve parfois un effet négatif sur les intentions d'usage (Tcha-Tokey et al., 2018), alors que dans d'autres études les participants rapportent des symptômes de mal des environnements sans qu'ils ne jugent pour autant l'expérience en réalité virtuelle négativement (von Mammen, Knotte, & Edenhofer, 2016; Wang & Suh, 2019). Ces dernières études suggèrent que le mal des environnements virtuels peut être considéré par les utilisateurs comme un élément normal de l'expérience en réalité virtuelle.

Nous avons également relevé que, pour le compagnon 2, le décalage de point de vue entre les utilisateurs était gênant. En effet, les utilisateurs, selon leur position dans le CAVE, n'ont pas tous le même point de vue puisqu'un seul est traqué. Pour certains auteurs, ce décalage est un problème lors de l'utilisation d'un CAVE entre plusieurs utilisateurs, puisqu'il complique la communication entre les utilisateurs, notamment lorsqu'ils cherchent à pointer des éléments. Ils proposent alors certaines solutions techniques pour remédier à ce problème, comme la mise en transparence des pièces pouvant occulter la vision de certains utilisateurs (Argelaguet, Kulik, Kunert, Andujar, & Froehlich, 2011; Simon & Scholz, 2005). À notre connaissance, les études sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle ne pointent pas cette gêne pour les utilisateurs. Premièrement, rares sont les études qui portent sur les CAVE, les visio-casques étant les plus répandus. Par ailleurs, les questionnaires employés dans les études sur l'acceptabilité balayaient de manière large la facilité d'utilisation : ils ne donnent l'opportunité aux utilisateurs de s'exprimer sur des aspects précis de l'interaction avec la technologie, par exemple, sur certaines fonctionnalités, certaines gênes ou dysfonctionnements ou sur des problèmes d'utilisabilité.

Enfin, la communication autour de la réalité virtuelle au sein de l'entreprise est un facteur de non-utilisation (Boudokhane, 2006) ou de non-usage (Laumer & Eckhardt, 2012). Les utilisateurs n'avaient pas connaissance que l'entreprise était équipée de réalité virtuelle (compagnon 2) et des possibilités qu'elle offre (compagnon 1). De plus, quand ils connaissaient les équipements, ils n'avaient pas toujours de retours d'expérience de personnes qui auraient utilisé la réalité virtuelle dans un projet. C'est notamment le cas du préparateur 1. La visibilité de la technologie et la visibilité de ses résultats ont été définies comme des caractéristiques importantes pour l'adoption d'une technologie (Rogers, 1995). Le manque d'informations sur la réalité virtuelle et ses avantages freine dans ce cadre le recours à la réalité virtuelle dans les projets de conception.

5.2.3. Facteurs d'acceptation identifiés dans l'usage : support à l'activité de conception et pouvoir donné aux compagnons

La deuxième partie de nos résultats concerne l'usage de la réalité virtuelle dans les sessions observées. Les données recueillies nous permettent d'identifier deux facteurs d'acceptation de la réalité virtuelle. Premièrement, elle soutient l'activité des utilisateurs. Nous notons dans les communications relevées que le partage de l'environnement virtuel permet à l'équipe d'expliquer et de s'informer sur le futur process, ainsi que d'évaluer le poste et de proposer des solutions de conception. Les données d'entretien vont également dans ce sens : pour les utilisateurs, la réalité virtuelle donne la possibilité d'évaluer le poste, de prendre des décisions de conception et de comprendre les tâches que les compagnons auront à effectuer.

Par conséquent, nous considérons que l'environnement virtuel prend le statut d'un objet intermédiaire de conception (Jeantet, 1998; Vinck, 2009). Les objets intermédiaires de conception comprennent par exemple les textes, les graphes, les schémas ou les croquis qui accompagnent l'activité de conception. Ils sont « produits, [ils] circulent, orientent, contraignent, ou sont mis à l'épreuve, critiqués, corrigés, complétés, bref constituent un support, quand ce n'est pas un partenaire, au travail des acteurs engagés dans le processus » (Jeantet, 1998). Pour Barcellini (2015), le rôle des objets intermédiaires de conception peut être résumé en deux fonctions : ils font office de représentations externes à l'activité de conception, et ils servent de supports de collaboration et de coordination.

Ces deux fonctions de l'environnement virtuel peuvent être mises en évidence dans les résultats que nous présentons. D'abord, l'environnement virtuel sert de représentation du futur poste d'assemblage, et de manière générale, du travail futur probable à ce poste, que les utilisateurs peuvent évaluer, critiquer et faire évoluer. Ensuite, il est un support de collaboration entre différents métiers (préparateurs, compagnons, chefs de ligne...), puisqu'il leur permet de discuter d'un même objet, dont la représentation se veut intelligible par tous, et de participer à sa conception.

En revanche, nous pensons que dans cette étude la fonction de l'environnement virtuel comme support de coordination est à questionner, puisque c'est davantage la maquette CAO qui semble occuper cette fonction. Les préparateurs et le chargé de réalité virtuelle ont dû se coordonner pour la construction de cette maquette, afin qu'elle soit compatible avec le logiciel RHEA, mais aussi suffisamment détaillée pour pouvoir conduire les évaluations attendues (voir partie 4.1 sur les attentes des préparateurs). Par ailleurs, les préparateurs rapportent une coordination de différents services de l'entreprise (préparation, outillage, méthodes, amélioration

continue...) pour la construction de cette maquette, qui a nécessité d'en combiner plusieurs (éléments avion, bâtis, équipements du poste, outils) dans un même fichier. Enfin, la maquette CAO est un support de coordination entre le travail des préparateurs et celui du fournisseur du poste, puisqu'elle évolue en fonction des modifications du cahier des charges apportées par les préparateurs.

D'autres facteurs d'acceptation sont également à relever dans l'usage de la réalité virtuelle dans ce projet. La réalité virtuelle donne du pouvoir aux compagnons, elle les requalifie : ils évoluent de simples futurs utilisateurs du poste en évaluateurs (Cahour, 2002), aux côtés des préparateurs et des autres décisionnaires. Par ailleurs, il faut noter que les sessions organisées permettent de réaliser, temporairement, un travail collectif sur un objet à concevoir (le poste), qui évolue selon les apports de chacun. La technologie intervient donc sur différentes dimensions de l'activité, que Bobillier Chaumon (2013, 2016) décrit dans l'acceptation située : la dimension organisationnelle, en permettant à l'équipe de conception de réaliser son activité en évaluant (et en faisant évoluer) le poste conçu ; la dimension professionnelle et identitaire en donnant du pouvoir aux compagnons dans la conception du poste ; et, la dimension interpersonnelle en créant un collectif de travail.

L'accompagnement des utilisateurs par le chargé de réalité virtuelle est le second facteur favorisant l'acceptation de la technologie. Nos résultats montrent qu'il a guidé les utilisateurs surtout lors de la première session, en les orientant et en donnant des explications sur la technologie et sur ses fonctionnalités. Nous postulons déjà plus tôt dans cette partie que ses interventions pourraient expliquer que la facilité d'utilisation soit peu évoquée par les utilisateurs. Nous pensons également qu'elle pourrait masquer les défauts d'utilisabilité du logiciel RHEA et permettre aux utilisateurs d'être autonomes dans la conduite de la session, sans être nécessairement autonomes dans la maîtrise de la technologie. Par exemple, le préparateur 2 a manipulé seul la technologie pendant la majorité de la seconde session, mais il a parfois fait appel au chargé de réalité virtuelle pour lui indiquer comment faire certaines manipulations ou pour résoudre des dysfonctionnements.

5.2.4. Facteur de rejet identifié dans l'usage : dysfonctionnements et erreurs de manipulation

Enfin, nous avons identifié, dans l'usage de la réalité virtuelle, un certain nombre de dysfonctionnements et d'erreurs de manipulation. Ce manque d'utilisabilité est à la fois à identifier comme un frein du point de vue des perceptions des utilisateurs, mais également dans l'usage, car il interfère avec l'activité de conception en cours. Il oblige parfois l'équipe à s'arrêter pour résoudre le dysfonctionnement (par exemple, en redémarrant le CAVE lors de la première session).

5.3. Limites de l'étude

Certaines limites de cette étude sont à relever. Tout d'abord, nous pouvons pointer une limite d'ordre méthodologique. Nous avons placé l'ensemble des dispositifs d'enregistrement vidéo et audio à proximité du CAVE. Par conséquent, pour des raisons de qualité des enregistrements audio, nous n'avons pu retranscrire que les communications ayant lieu à l'intérieur CAVE. Pourtant, nous avons observé que des communications pertinentes pour étudier l'acceptation de la réalité virtuelle avaient lieu hors du CAVE, les utilisateurs profitant de leur sortie de l'environnement virtuel pour commenter collectivement leurs impressions sur la technologie ou pour énoncer

certains besoins. Nous pensons donc que ces communications auraient pu nous éclairer sur l'expérience des utilisateurs.

Une autre limite à relever concerne le recrutement des personnes interrogées. Les résultats obtenus proviennent d'un échantillon limité de l'équipe de conception : nous n'avons pu interroger que trois personnes sur l'ensemble des utilisateurs ayant participé aux sessions. L'accès difficile aux autres utilisateurs (chefs de ligne, préparateurs, animateurs qualité) ne nous a pas permis de les rencontrer en entretien. Leur participation à l'étude aurait pourtant permis de comprendre les raisons les motivant à participer à ces sessions et de saisir plus finement les enjeux derrière l'intégration de la réalité virtuelle dans ce projet de conception. Nous considérons également que la limite la plus importante de notre étude réside dans l'absence d'entretien avec le préparateur 2 suite aux sessions en réalité virtuelle. Nous pensons que son discours aurait pu nous apporter des informations riches sur les effets de l'usage sur les perceptions des utilisateurs, et notamment sur l'effet des dysfonctionnements et des erreurs de manipulation sur la manière dont les utilisateurs jugent de la facilité d'utilisation et de « l'apprenabilité » de la réalité virtuelle. Il aurait également pu nous donner davantage d'informations sur les suites du projet, en complément de celles données par le préparateur 1. Pour ces différentes raisons, ces résultats sont à considérer comme de premiers résultats sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans des projets de conception de poste.

Par ailleurs, il n'a pas été possible de rencontrer les utilisateurs avant les sessions en réalité virtuelle. Nous avons donc recueilli leurs perceptions suite à l'utilisation (en phase *d'acceptation* de la réalité virtuelle), sans avoir connaissance de leurs perceptions *a priori* (en phase *d'acceptabilité*). L'étude réalisée concerne uniquement l'acceptation de la réalité virtuelle, sans que son acceptabilité n'ait pu être prise en compte. Des études longitudinales permettraient de déterminer s'il y a une rétroaction de l'usage (Brangier et al., 2010), c'est-à-dire si l'utilisation de la technologie influence l'évolution des perceptions des utilisateurs sur ses qualités.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 1

L'objectif de cette étude était d'identifier des **facteurs d'acceptation et de rejet** de la réalité virtuelle dans un **projet de conception de postes de fabrication**. Nous nous sommes intéressée aux **perceptions** des utilisateurs sur la réalité virtuelle ainsi qu'à **leur utilisation** de cette technologie.

Deux sessions en réalité virtuelle ont été conduites dans un CAVE. Nous avons conduit des **entretiens semi-directifs** avec **deux préparateurs a priori** des sessions, puis, suite aux sessions, nous avons conduit de nouveaux entretiens avec **un des préparateurs** ainsi qu'avec **deux compagnons**. Nous avons également procédé à une **analyse des comportements** des utilisateurs lors de ces sessions.

Pour commencer, nous avons relevé des **facteurs d'acceptation** de la réalité virtuelle. Nos résultats mettent en évidence l'importance de **l'utilité perçue** dans l'acceptation de cette technologie. Leur jugement sur l'utilité de la réalité virtuelle repose sur les **fonctionnalités** qu'elle offre – elle permet d'évaluer le poste et de prendre des décisions de conception – et sur ses **bénéfices** par comparaison aux logiciels de CAO et aux plans 2D. Par ailleurs, les utilisateurs s'appuient sur certaines **caractéristiques des projets de conception** pour déterminer s'ils auraient recours (ou non) à la réalité virtuelle. Ainsi, ils considèrent qu'ils l'utiliseraient dans des projets nouveaux et de grande ampleur, et qu'elle n'est pas utile pour des projets de duplication de postes.

Nous relevons également certaines caractéristiques de la réalité virtuelle qui sont perçues positivement par les utilisateurs. Il s'agit de sa **facilité d'utilisation**, du **réalisme** de l'environnement virtuel ainsi que du sentiment de **présence** ressenti par les utilisateurs lors des sessions.

En nous intéressant à l'usage effectif de la réalité virtuelle lors des sessions, nous montrons que l'environnement virtuel est utilisé par les utilisateurs comme un **objet intermédiaire de conception** (Jeantet, 1998; Vinck, 2009), c'est-à-dire qu'il est utilisé par les participants à la revue de projet comme une représentation des futurs postes et du travail futur probable à ces postes, mais également comme un support de collaboration entre différents métiers (préparateurs, compagnons, animateurs qualité...).

Nous soulignons par ailleurs l'importance dans ces sessions du **chargé de réalité virtuelle**, qui permettait aux utilisateurs d'être **autonomes** dans la conduite de la revue de projet, sans être autonomes dans l'utilisation du CAVE. Nous pensons que **l'assistance** qu'il a apportée aux utilisateurs a également pu **masquer les défauts d'utilisabilité** du système.

Nous avons également identifié des **facteurs de rejet** de la réalité virtuelle. Il s'agit d'abord de **manques** dans les sessions, c'est-à-dire de besoins des utilisateurs que les sessions n'ont pas satisfaits. Ils concernent **l'absence de simulation des opérations** à proprement parler et **l'intégration tardive** de la réalité virtuelle dans la conduite du projet. Le **rôle des compagnons** dans les revues de projet est également à discuter : nos résultats suggèrent qu'ils ont majoritairement occupé le rôle de futurs utilisateurs (Cahour, 2002), à qui les préparateurs expliquaient leurs futures tâches.

Les utilisateurs perçoivent par ailleurs négativement **certaines caractéristiques** de la réalité virtuelle : sa **fiabilité** (qui renvoie aux dysfonctionnements rencontrés) et le **mal des environnements virtuels**.

Enfin, le **manque d'informations** des utilisateurs sur la réalité virtuelle est à pointer. En effet, ils n'ont pas toujours connaissance que **l'entreprise est équipée** de réalité virtuelle et des **possibilités** qu'elle offre.

Nous présenterons dans le prochain chapitre une seconde étude sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans un projet de conception de postes.

CHAPITRE 2. ÉTUDE 2 : PROJET DE NOUVEAUX POSTES D'ASSEMBLAGE

1. OBJECTIFS

Cette seconde étude sur l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception de postes répondait aux mêmes objectifs que notre première étude : il s'agissait d'étudier l'acceptation de la réalité virtuelle, et plus spécifiquement, d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de cette technologie en regard des perceptions des utilisateurs et de l'usage qu'ils en font. À la différence de notre première étude, où la conception de nouveaux postes de fabrication provenait d'une modification d'un process de fabrication existant, dans ce projet, les éléments assemblés étaient nouveaux sur le site et requéraient de concevoir de nouveaux postes de fabrication. Nous verrons également que le contexte dans lequel s'inscrit cette étude différait fortement de celui de la première étude.

2. ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Le projet comprenait la conception d'une dizaine de postes d'assemblage. C'est donc un projet de grande envergure qui mobilisait des moyens humains, matériels et financiers importants. Nous avons par le passé (lors de notre stage de master 2) travaillé avec l'ergonome du site, et collaboré avec le chargé d'affaires outillage qui était en charge de plusieurs postes d'assemblage pour ce projet. Ce sont ces deux acteurs qui nous ont permis de suivre la conception des postes.

Comme pour l'ensemble des études conduites, nous nous sommes engagée à ne pas divulguer d'informations précises sur les process de fabrication, sur les éléments fabriqués ou encore sur les outils utilisés. Cependant, pour cette étude, les règles de confidentialité du projet étaient bien plus strictes que pour les autres études, ce qui a ralenti la réalisation de l'étude et, nous le pensons, complexifié la prise de contact avec les acteurs. Notre intégration au projet nécessitait de signer des accords de confidentialité, à la fois auprès des responsables du projet, mais aussi auprès des chargés de réalité virtuelle – qui ont préféré que nous nous engagions à nouveau à l'écrit, puisqu'ils nous permettaient de visualiser et de filmer les environnements virtuels utilisés lors des sessions. L'ergonome et le chargé d'affaires ont appuyé notre travail de recherche auprès des responsables du projet, pour que nous puissions assister aux sessions en réalité virtuelle, mais également pour que nous puissions conduire des entretiens auprès des utilisateurs.

Il nous faut également évoquer la temporalité du projet et les contraintes temporelles auxquelles les acteurs étaient soumis. Le chargé d'affaires outillage et les préparateurs en charge du projet avaient une forte charge de travail et ils devaient respecter des délais courts. Par ailleurs, certaines difficultés ont entraîné du retard dans le projet. À titre d'exemple, un an a passé entre la signature des accords de confidentialité et les sessions en réalité virtuelle. Pour ces raisons, il nous a été difficile d'être tenue informée des avancées du projet : nous avons par exemple peu d'informations sur les réunions organisées entre les différents acteurs et sur les modifications qui étaient apportées aux postes.

Pour finir, deux sessions en réalité virtuelle ont été conduites, sur trois postes différents. La première a eu lieu avec le CAVE d'IndustriLAB et portait sur un seul

poste ; la seconde session a été conduite à l'aide d'un visio-casque et portait sur deux postes. Nous allons maintenant présenter notre méthodologie.

3. MÉTHODOLOGIE

Afin d'étudier les perceptions des utilisateurs et l'usage de la réalité virtuelle, nous avons utilisé les mêmes méthodes de recueil que celles décrites dans l'étude 1, c'est-à-dire des entretiens semi-directifs et des observations filmées des sessions. Les méthodes d'analyse étaient également similaires : elles consistaient en une analyse thématique des entretiens et en un codage des comportements des utilisateurs. Nous rappellerons brièvement notre méthodologie dans les sections suivantes.

3.1. Recueil des données

3.1.1. Entretiens semi-directifs

3.1.1.1. Guide d'entretien

Nous avons utilisé dans cette étude le guide d'entretien présenté lors de l'étude 1 et repris en annexe 1. Nous abordions différentes thématiques :

- une présentation générale de la personne interrogée, ainsi que des outils qu'elle utilise habituellement dans les projets de conception ;
- son expérience antérieure avec la réalité virtuelle ;
- ses perceptions sur la réalité virtuelle, notamment sur son utilité dans le projet ;
- une comparaison de la réalité virtuelle et de la CAO ;
- la manière dont la réalité virtuelle a été intégrée dans le projet de conception ;
- ses intentions d'usage de la réalité virtuelle.

3.1.1.2. Caractéristiques des personnes interviewées

D'abord, nous avons conduit un entretien avec le chargé d'affaires outillage en charge de la conception des postes avant les sessions en réalité virtuelle. Suite aux sessions, nous avons conduit des entretiens avec huit participants¹⁶ aux sessions. Le Tableau 12 donne des informations générales sur les personnes interrogées.

Tableau 12. *Caractéristiques des personnes interviewées*

Interviewés	Ancienneté à ce poste ¹⁷	Expérience antérieure avec la réalité virtuelle dans un projet de conception	Sessions	Entretien
Chargé d'affaires outillage	14 ans, 1 an sur le projet	Oui, à plusieurs reprises	Sessions 1 et 2	Avant et après les sessions

¹⁶ Le chargé d'affaires outillage a donc été interrogé à deux reprises : une fois avant les sessions en réalité virtuelle et une seconde fois suite aux sessions.

¹⁷ Nous précisons l'ancienneté des concepteurs sur le projet, car ils y travaillent à plein temps, alors que les compagnons et le médecin du travail sont intervenus ponctuellement sur la conception.

Interviewés	Ancienneté à ce poste ¹⁷	Expérience antérieure avec la réalité virtuelle dans un projet de conception	Sessions	Entretien
Préparateur A	8 ans, 1 an sur le projet	Oui, expérience ancienne sur CADwall	Sessions 1 et 2	Après
Préparateur B	13 ans, depuis 1 an sur le projet	Oui, expérience ancienne sur CADwall	Session 2	Après
Compagnon A	28 ans	Non	Session 1	Après
Compagnon B	18 ans	Non	Session 1	Après
Compagnon C	18 ans	Oui, participation à un projet antérieur	Session 2	Après
Compagnon D	13 ans	Non	Session 2	Après
Médecin du travail	5 ans	Oui, brièvement dans le CAVE pour un projet antérieur	Session 1	Après

3.1.2. Observations filmées des sessions en réalité virtuelle

Comme pour l'étude 1, nous avons filmé et procédé à un enregistrement audio des sessions.

3.1.2.1. Conditions et dispositifs d'enregistrement

Deux sessions en réalité virtuelle ont eu lieu. La première s'est déroulée dans le CAVE d'IndustriLAB, avec les lunettes 3D et la manette présentées dans l'étude 1. Le logiciel RHEA¹⁸ était également utilisé. Comme pour l'étude 1, nous avons placé une caméra à l'intérieur du CAVE pour filmer les utilisateurs, et nous filmions l'environnement virtuel à l'extérieur du CAVE.

Lors de la seconde session en réalité virtuelle, un visio-casque de type HTC Vive a été utilisé, ainsi que le logiciel SkyReal, qui permet, tout comme RHEA pour le CAVE, d'intégrer des données issues de CAO au sein d'un environnement virtuel immersif. Lors de cette seconde session, un seul utilisateur portait le visio-casque. L'ensemble des utilisateurs faisaient face à un écran qui transmettait les images de l'environnement virtuel. Nous avons filmé les utilisateurs de face et nous avons placé une seconde caméra fixe pour filmer l'écran (faute de pouvoir capturer le flux vidéo de l'environnement virtuel directement).

Nous avons également procédé à un enregistrement audio des sessions. Lors de la première session, le dictaphone était à l'intérieur du CAVE. Lors de la seconde, il était posé à proximité des utilisateurs, dans l'éventualité où la piste audio extraite des vidéos ne nous permettrait pas de retranscrire aisément les communications.

¹⁸ Pour rappel, le logiciel RHEA permet de construire un environnement virtuel immersif à partir d'une maquette CAO.

3.1.2.2. Utilisateurs participant aux sessions en réalité virtuelle

Deux matinées (de 9 h à 12 h) ont été réservées à IndustriLAB pour la réalisation des sessions. Ces matinées comprenaient les temps d'installation des dispositifs (CAVE ou visio-casque), les temps d'immersion, les moments d'échanges avant, pendant et après l'utilisation, ainsi que les temps de pause. Puisqu'elles portaient sur des postes différents, les participants variaient d'une session à l'autre. Seul le chargé d'affaires outillage et le préparateur A ont assisté aux deux sessions.

Lors de la première session, étaient présents le chargé de réalité virtuelle, le chargé d'affaires outillage, trois préparateurs et deux compagnons. Le médecin du travail a également pris part brièvement à la session. Le Tableau 13 présente les participants à cette session, le temps qu'ils ont passé dans le CAVE et précise s'ils ont utilisé ou non la manette. Nous avons observé 1 h 22 d'utilisation du CAVE.

Tableau 13. *Participants à la première session en réalité virtuelle, temps passé dans le CAVE et utilisation de la manette*

Participant à la session	Temps total passé dans le CAVE	Proportion de temps de la session passé dans le CAVE	Utilisation de la manette
Chargé de réalité virtuelle 1	47 min 29	58 %	Oui
Chargé d'affaires outillage	N'est pas entré dans le CAVE	N'est pas entré dans le CAVE	Non
Préparateur A	49 min 30	60 %	Oui
Préparateur C	28 min 22	34 %	Oui
Préparateur D	14 min 21	17 %	Oui
Compagnon A	28 min 22	34 %	Oui
Compagnon B	39 min 28	47 %	Oui
Médecin du travail	5 min 44	7 %	Non

Le chargé d'affaires, deux préparateurs et deux compagnons ont assisté à la seconde session, où un visio-casque a été utilisé. Elle a duré 2 h 36. Lors de cette session, deux postes ont été traités : un premier pendant 1 h 09, et un second pendant 1h27. Le Tableau 14 indique les personnes ayant participé à cette session, la durée de leur participation à la session et la durée de leur utilisation du casque. Nous précisons également que le préparateur A n'a traité que le premier poste ; il a quitté la session à la fin de la revue de la première maquette.

Tableau 14. *Participants à la seconde session en réalité virtuelle, temps passé à porter le visio-casque et postes traités*

Participant à la session	Temps de présence lors de la session (cumulé)	Durée totale de port du casque	Proportion de temps de la total passé à porter le visio-casque	Postes traités
Chargé de réalité virtuelle 2	2 h 21	45 s	0,5 %	Postes 1 et 2
Chargé d'affaires outillage	2 h 36	N'a pas porté le visio-casque	N'a pas porté le visio-casque	Postes 1 et 2
Préparateur A	55 min	8 min 53	5 %	Poste 1
Préparateur B	2 h 36	26 min 56	17 %	Postes 1 et 2
Compagnon C	2 h 36	57 min 36	37 %	Postes 1 et 2
Compagnon D	2 h 36	45 min 55	29 %	Postes 1 et 2

3.2. Méthodes de traitement des données

3.2.1. Analyse thématique des entretiens

Les entretiens conduits avec les utilisateurs ont été traités de la même manière que dans l'étude 1. Nous avons entièrement retranscrit nos entretiens et procédé à une analyse thématique (Braun & Clarke, 2006) par l'intermédiaire du logiciel Nvivo 12 (QSR International Pty Ltd, 2019).

3.2.2. Codage des vidéos des sessions en réalité virtuelle

Nous avons utilisé le logiciel The Observer XT 14 (Noldus, 2017) afin de coder les comportements des utilisateurs lors des sessions. Pour la session dans le CAVE, nous avons utilisé la même grille de codage que pour l'étude précédente (Partie III. Chapitre 1.3.1.1.1). Nous avons relevé deux catégories de comportements : d'une part, les comportements de l'utilisateur dans la salle immersive et, d'autre part, les comportements de l'utilisateur dans l'environnement virtuel. Nous avons ajouté à la grille de codage le traçage de tuyauterie dans les Comportements des utilisateurs dans l'environnement virtuel. Il s'agit d'une fonctionnalité du logiciel RHEA qui n'avait pas été utilisée lors des sessions précédentes.

Pour la session avec le visio-casque, puisque le logiciel de réalité virtuelle utilisé était différent (il s'agissait de SkyReal), nous avons dû créer une nouvelle grille de codage (Tableau 15), à partir du visionnage des vidéos. Elle comprend quatre catégories : les comportements de l'utilisateur dans l'environnement virtuel, les dispositifs qu'il utilise, ses comportements dans la pièce et sa présence ou son absence dans la pièce. Puisqu'un seul utilisateur portait le casque, il nous fallait indiquer la participation des autres utilisateurs. Pour cela, nous avons indiqué leur présence dans la pièce. Il est à noter que lorsque les participants étaient dans la pièce, ils étaient toujours à proximité de l'utilisateur qui portait le visio-casque, et qu'ils regardaient un écran déporté sur lequel l'environnement virtuel était projeté. Si la

situation avait été différente, il nous aurait fallu indiquer quand les utilisateurs étaient présents dans la pièce sans observer l'environnement virtuel.

Tableau 15. Grille de codage de la session en réalité virtuelle avec visio-casque

Comportements dans l'EV	Dispositifs	Comportements dans la pièce	Présence dans la pièce
<ul style="list-style-type: none"> • Ne fait rien dans l'EV • Se déplace dans l'EV • Parcourt le menu • Tient un objet • Sélectionne un objet 	<ul style="list-style-type: none"> • N'utilise pas de dispositifs • Porte le visio-casque • Tient la manette 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne fait rien dans la pièce • Tient le fil • Prend une mesure • Est assis sur une chaise • Est debout sur des livres 	<ul style="list-style-type: none"> • N'est pas dans la pièce • Est dans la pièce

Il est à noter que la grille comprend certaines « absences » de comportements, car le logiciel The Observer a besoin d'un comportement par défaut. Nous avons défini « ne fait rien dans l'environnement virtuel », « n'utilise pas de dispositifs », « ne fait rien dans la pièce » et « n'est pas dans la pièce » comme des comportements par défaut.

3.2.3. Recueil des dysfonctionnements et des difficultés de manipulation

Comme pour l'étude 1, nous avons répertorié les dysfonctionnements de la technologie, ainsi que les difficultés rencontrées par les utilisateurs pour utiliser certaines fonctionnalités.

3.2.4. Analyse des communications lors des sessions en réalité virtuelle

Nous avons analysé les échanges des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle. Notre corpus est composé de 110 pages : 37 pages pour la première session et 73 pages pour la seconde. Nous avons conservé les cinq catégories de communications présentées dans l'étude 1 :

- *l'utilisation de la technologie*, qui regroupe les communications relatives à l'utilisation collective du CAVE et au partage de l'environnement virtuel ;
- *le partage de point de vue*, qui renvoie aux communications relatives aux différences dans la visualisation de l'environnement virtuel ;
- *la revue de projet*, qui comprend les communications relatives au processus de revue des postes d'assemblage conçus ;
- *la référence au monde physique*, où nous avons placé les communications qui font des liens entre l'environnement virtuel et le monde physique ;
- une catégorie *Autres*, à laquelle nous avons attribué les communications qui n'appartenaient à aucune des autres catégories.

L'analyse des transcriptions nous a amenée à ajouter quatre codes à la grille, qui ne figuraient pas dans l'étude précédente :

- *les demandes de solutions ou d'évaluations de solutions* dans la catégorie Revue de projet (par exemple : « *Est-ce qu'il faut monter ou descendre [le poste] ?* ») ;
- *les explications sur la configuration du poste ou de l'élément avion* dans la catégorie Revue de projet (par exemple : « *Donc là, en fait, on a plusieurs sous-ensembles* ») ;
- *les questions sur la configuration du poste ou de l'élément avion* dans la catégorie Revue de projet (par exemple : « *Il y a des lisses dessus ?* ») ;
- *les informations sur un évènement dans le monde physique* dans la catégorie Utilisation de la technologie (par exemple : « *Attention il y a la table, il faut que tu recules* »).

Notre grille de codage se trouve en annexe (Annexe 2, p. 261).

4. RÉSULTATS

4.1. Attentes du chargé d'affaires *a priori* des sessions en réalité virtuelle

Nous avons conduit un entretien *a priori* des sessions en réalité virtuelle avec le chargé d'affaires outillage en charge du projet. Cet entretien visait à recueillir ses attentes vis-à-vis des sessions en réalité virtuelle.

Pour commencer, il faut souligner que ce chargé d'affaires a accumulé une expérience importante de la réalité virtuelle dans des projets de conception, puisqu'il a eu l'occasion de l'utiliser à plusieurs reprises pour des projets différents. Il était d'ailleurs identifié par les chargés de réalité virtuelle comme la personne ayant eu le plus recours à la réalité virtuelle pour des projets de conception dans l'entreprise. Par conséquent, cet entretien nous a également permis de recueillir ses perceptions sur la réalité virtuelle et ses motivations à l'intégrer dans ses projets.

En abordant ses expériences antérieures avec la réalité virtuelle, il a surtout souligné l'utilité des séances conduites dans la conception des postes, notamment pour apporter des modifications, par exemple sur des hauteurs de travail (« *La dernière fois qu'on a pu le faire, on a modifié une hauteur de praticable. Alors des fois, ça peut ne pas être grand-chose. Là, dans le dernier cas, on a monté de dix centimètres. [...] Ça peut paraître tout bête, mais quand on a fait l'exercice, on a vu que ces dix centimètres c'était important.* »).

Il a également expliqué l'intérêt de la réalité virtuelle en regard de deux difficultés dans son travail. La première est que le logiciel de CAO CATIA®, l'outil exclusivement utilisé par le service outillage, est limité ; les outilleurs utilisent des mannequins pour anticiper les postures des opérateurs lors des futures opérations au poste, mais cette simulation n'est pas toujours fiable (« *Parce que quand on travaille sur de la 3D dans CATIA, c'est qu'on utilise des mannequins, on les configure sur certaines postures, mais c'est pas forcément une posture super naturelle* »). La seconde difficulté qu'il a soulevée est le manque de compréhension du travail des outilleurs par les services avec lesquels ils collaborent (« *On est toujours un peu à part dans notre coin, c'est qu'on n'y prête pas trop d'importance [à l'outillage]* »), qui a pour conséquence des demandes d'outillage qui peuvent paraître abstraites (« *On veut un outil et après point barre. On se débrouille* »), mais également des désaccords sur certaines décisions de conception, sans nécessairement comprendre que les outilleurs sont soumis à certaines contraintes de conception (« *Donc c'est toujours*

difficile de mettre en avant, beaucoup de choses, beaucoup de choses à faire valider parce que certes il y a l'ergonomie, mais on demande aussi des validations du calcul du bureau d'études pour faire des manutentions tout ça. Et tout ça, ça a du mal à faire passer les choses »).

Ces difficultés expliquaient en partie la décision du chargé d'affaires d'utiliser la réalité virtuelle. En effet, elle lui permettait de remédier à certaines limites de la CAO (« *Des trucs qu'on a fait sur la 3D [en CAO] c'est bien, mais c'est mieux de le faire sur de la réalité virtuelle* ») et de collaborer plus efficacement avec les autres services (« *C'est aussi dans son intérêt [du chef de production] de bien faire les choses. C'est pour ça que quand on met des gens qui sont impliqués dans le truc, c'est plus facile* »).

Par ailleurs, il a mentionné différentes attentes envers la réalité virtuelle dans le projet. D'abord, il considérait qu'elle était utile pour simuler les opérations d'assemblage (« *C'est vraiment le reflet de ce qu'on va faire en prod* »). Elle permettait également de trouver des solutions de conception, en testant plusieurs solutions alternatives, notamment des hauteurs de bâti différentes (« *Le but ça va être, quand on va faire l'exercice, on va dire bah là tiens on va remonter le bâti de vingt centimètres, on va voir ce que ça donne, là on va redescendre les trucs* »).

De manière plus générale, il pense que la réalité virtuelle est utile pour valider un jalon de conception. Les projets du service outillage sont en effet organisés selon différentes étapes qui sont marquées par différentes revues de projets. C'est une organisation fréquente dans la conception industrielle (Fowler, 2015). La première revue de projet est la revue de projet conceptuelle, qui clôt la phase initiale du projet. Elle établit les objectifs du projet et ses contraintes, ainsi que les spécifications générales de l'outillage. La seconde revue de projet est la revue de projet préliminaire (PDR pour *Preliminary Design Review*). Elle valide les principales décisions de conception. Enfin, la dernière revue de projet, la CDR (pour *Critical Design Review*) valide la conception finale de l'outillage, après que différentes études (études sur les propriétés de l'outillage, analyses des risques, études ergonomiques...) ont été conduites. Elle précède la fabrication et l'implantation de l'outillage. Le chargé d'affaires pense que la réalité virtuelle devrait servir à valider la PDR, c'est-à-dire qu'elle validerait les principales décisions de conception. Il faut noter que, dans ce projet, les sessions en réalité virtuelle ont été conduites tardivement et que ce jalon avait d'ores et déjà été validé (« *Pour moi, c'est ce qu'il faudrait faire sur les prochains projets, dans le jalon de la PDR, pour valider la PDR, il faudrait qu'on ait validé la réalité virtuelle* »). Le chargé d'affaires juge qu'en phase amont, elle pourrait permettre de tester différentes alternatives avant validation (« *Des fois on peut aussi l'utiliser pour se dire, bah alors là on est vraiment bloqués, on ne sait pas, on ne sait pas à quelle hauteur mettre le poste. [...] On se dit il faut faire l'exercice avec une hypothèse et puis à partir de là bah après on pourra corriger* »).

En revanche, il a pointé des limites à l'utilisation de la réalité virtuelle dans les projets. La première était son coût, puisqu'il faut louer les équipements et la salle à IndustriLAB (« *Parce que bon ça a un coût* »). Il pense par ailleurs que certains outilleurs peuvent choisir de ne pas l'utiliser parce qu'ils n'en percevaient pas l'utilité (« *Je pense qu'il y en a pas beaucoup qui voient l'intérêt de la chose* »). Pour répondre à ces freins, il considère que le soutien de la production, de personnes qui ont une « vision du terrain », peut faciliter l'adoption de la réalité virtuelle dans un projet (« *Souvent quand on peut faire ça c'est quand on est appuyés par des responsables de prod ou des gens qui sont vraiment auprès du produit* »). Dans le cadre du projet

sur lequel portait cette étude, le soutien de la direction a également été décisif (« [Les sessions, malgré le retard du projet, n'ont pas été annulées] *Parce que le directeur du site voulait que ça se fasse* »).

4.2. Perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle

Nous avons conduit des entretiens avec les utilisateurs suite aux sessions en réalité virtuelle pour recueillir leurs perceptions sur cette technologie et déterminer s'ils avaient l'intention de l'utiliser à nouveau. Nous avons identifié sept thématiques lorsque nous avons analysé ces entretiens. Elles portaient sur :

- l'utilité de la réalité virtuelle ;
- ses avantages en comparaison avec la CAO ;
- les caractéristiques de la réalité virtuelle qui sont perçues positivement par les utilisateurs ;
- ses limites ;
- des points de comparaison entre le visio-casque et le CAVE ;
- les critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception.

Nous résumons nos principaux résultats dans la Figure 31.

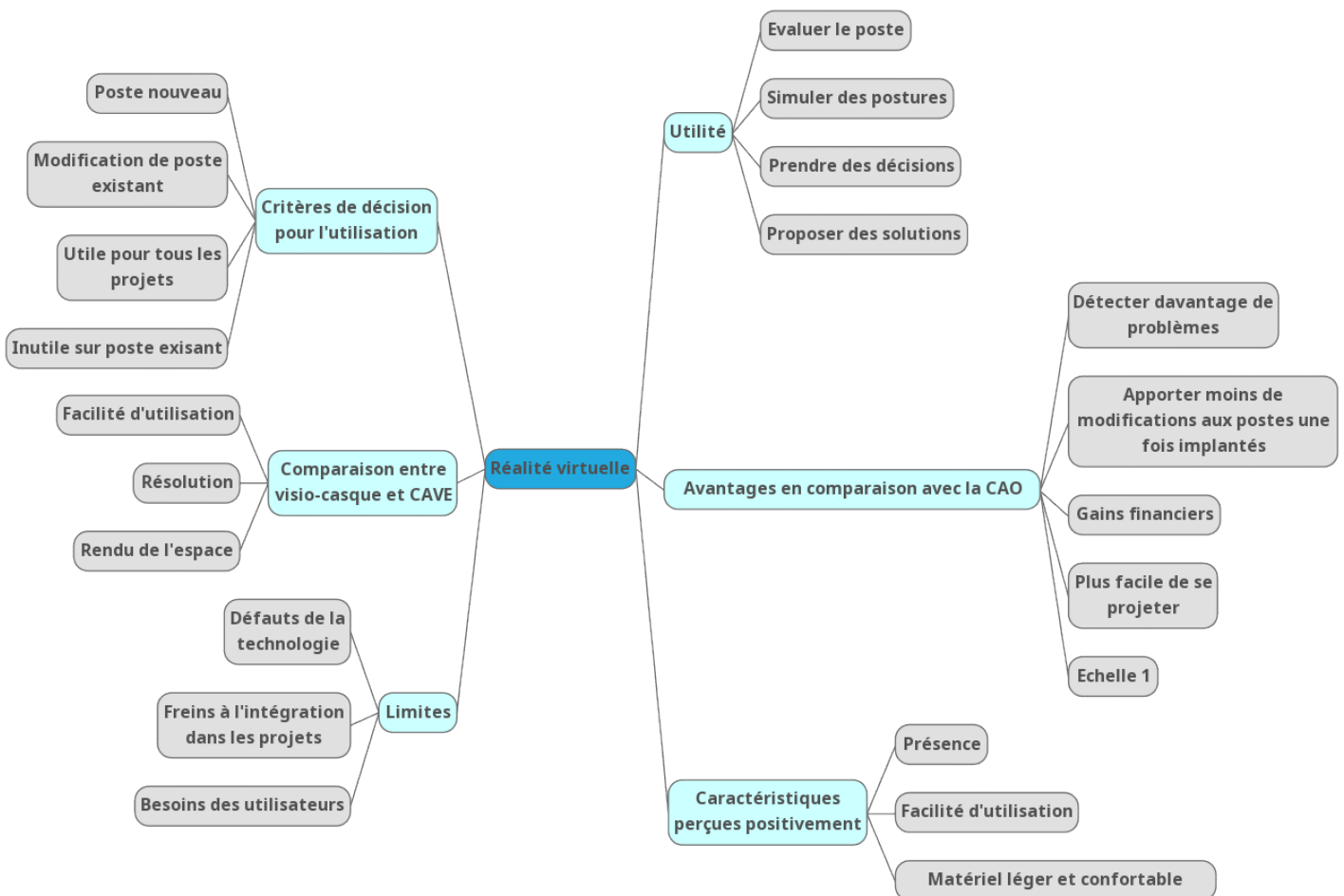


Figure 31. Synthèse des perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle

Il faut noter que cinq des utilisateurs interrogés avaient déjà utilisé la réalité virtuelle dans des projets de conception, comme nous l'avons indiqué dans le Tableau 12. Les compagnons A, B et D n'avaient jamais utilisé la réalité virtuelle dans des projets de conception, mais savaient que l'entreprise était équipée (« *J'ai jamais été dans la salle, je savais qu'elle était là, je savais à quoi elle servait, j'avais jamais eu la chance de mettre les pieds dedans* », compagnon B). Les compagnons B et D n'avaient aucune expérience avec cette technologie (« *Non, même pas. Non, les casques avec les téléphones ou voilà ? Non, j'avais jamais essayé* », compagnon D), alors que le compagnon A avait déjà utilisé un visio-casque.

4.2.1. Utilité de la réalité virtuelle dans les projets

Les utilisateurs pensent que la réalité virtuelle était utile dans les projets de conception, car elle répond à certains de leurs besoins (Tableau 16) (92 références). En premier lieu, elle leur permet d'évaluer les postes conçus (« *Mais malgré tout on a quand même remarqué que dans cette zone-là où il y avait pas mal de, de temps à passer où le bâti, d'un point de vue ergonomie pure, était trop bas* », compagnon A). Elle leur permet également de simuler les postures des compagnons (« *Mais comme ça c'est bien parce qu'on voit nous ergonomiquement les positions qu'on doit prendre pour travailler* », compagnon B). À partir de ces évaluations, ils pouvaient prendre des décisions de conception (« *Sur chaque poste qu'on a passé en revue, on a fait les modifs* », chargé d'affaires). Enfin, ils jugent la réalité virtuelle utile pour inclure les compagnons dans la conception (« *Nous on l'a vu comme ça, comme étant utile pour, on a impliqué les compagnons parce que c'est eux qui vont travailler* », préparateur B) et pour pouvoir leur expliquer facilement le projet (« *Ça a permis aussi de mettre un peu de présenter aussi aux compagnons, parce que pareil sur PC les compagnons ils ne se rendent pas bien compte* », préparateur A). Les compagnons considèrent qu'elle est utile pour pouvoir proposer des solutions de conception (« *Moi j'ai vu le problème il fallait qu'on trouve tout de suite, parce que c'était le moment, et je me suis dit nous derrière on va peut-être en baver pendant des années alors qu'on aurait pu trouver tout de suite la solution* », compagnon D).

Tableau 16. Besoins évoqués par les utilisateurs

Besoins évoqués par les utilisateurs	Nombre d'utilisateurs évoquant le besoin ¹⁹	Métiers
Évaluer le poste	7/7	Chargé d'affaires, préparateurs, compagnons
Simuler des postures	7/7	Chargé d'affaires, préparateurs, compagnons
Prendre des décisions	3/7	Chargé d'affaires, préparateurs
Proposer des solutions	3/7	Compagnons

¹⁹ Dans les tableaux de résultats, nous traiterons le médecin du travail séparément des autres utilisateurs pour les résultats qui concernent la revue de projet, puisqu'elle a expliqué en entretien qu'elle ne participait pas à la revue de projet en elle-même.

Besoins évoqués par les utilisateurs	Nombre d'utilisateurs évoquant le besoin ¹⁹	Métiers
Prendre connaissance du poste pour affecter des personnes en restriction médicale	1	Médecin du travail
Former les compagnons au process	1/7	Préparateur
Calculer des temps de cycle	1/7	Préparateur

Le médecin du travail a par ailleurs évoqué des besoins différents des autres utilisateurs. Pour elle, il s'agissait de prendre connaissance du poste, afin de savoir si du personnel en restriction médicale pourrait y être affecté (« *On va me dire bon bah voilà celui-là, ces gens-là est-ce que tu penses qu'ils vont pouvoir aller sur le projet ? Et pour que je puisse me positionner il faut bien que j'ai une idée des postes* »).

Le préparateur B a également évoqué des cas d'usages de la réalité virtuelle que les autres utilisateurs n'ont pas mentionnés. Il a proposé la formation des compagnons au process, ainsi que le calcul des temps de cycle des opérations (« *On peut très bien dire demain, mon chiffre FERT [Fiche d'Étude Rapide des Temps], je le fais, ma base c'est plus le FERT, c'est une gestuelle réelle qui est faite dans un environnement virtuel. C'est des images mises bout à bout. C'est des séquences mises bout à bout qui te font ton cycle, qui te font ton Takt²⁰ d'assemblage* »).

4.2.2. Avantages de la réalité virtuelle en comparaison avec la CAO

Les utilisateurs ont par ailleurs relevé différents avantages à la réalité virtuelle, en comparaison avec la CAO (Tableau 17) (43 références). Premièrement, ils jugent qu'elle permet de détecter davantage de problèmes (« *Sans cette séance-là on n'aurait peut-être pas fait les corrections* », chargé d'affaires). Elle entraîne donc moins de modifications une fois les postes implantés (« *Comme on dit, c'est préférable de casser maintenant que après ou de devoir bricoler ou faire avec* », chargé d'affaires) et par conséquent des gains financiers (« *Ça va engendrer des frais supplémentaires qui nous permettraient peut-être de rentrer dans nos frais derrière, parce que c'est peut-être pas des modifs qu'on aura à demander plus tard sur nos outils* », préparateur B).

Des bénéfices ont également été pointés concernant la technologie-même. Pour les utilisateurs, il est plus difficile de se projeter en CAO, c'est-à-dire de se rendre compte des distances et des hauteurs de travail (« *Bah on l'a [le poste] dans les grandes lignes, mais après c'est dur de se projeter, à être vraiment à la place de la personne, comment vraiment ça va être fait* », compagnon C). Ils ont donc pointé la visualisation de maquettes à l'échelle 1 comme un avantage de la réalité virtuelle (« *Mais là en fait ce qui est très intéressant là, concernant nous ce qu'on a vu l'autre fois, c'est le fait de l'échelle* », compagnon A), notamment alors qu'ils ont l'habitude d'utiliser des mannequins en CAO pour évaluer les hauteurs de travail (« *Tandis qu'avec CATIA, au pire on met des mannequins, mais on n'a pas la sensation si on est bien positionné ou pas* », préparateur A).

²⁰ Le Takt-time est une expression utilisée dans les organisations en lean production. Elle renvoie à l'unité de temps lors duquel un produit doit être fabriqué pour répondre à la demande d'un client (Frandsen, Berghede, & Tommelein, 2013).

Tableau 17. *Avantages de la réalité virtuelle par comparaison à la CAO*

Avantages de la réalité virtuelle par comparaison à la CAO	Nombre d'utilisateurs évoquant l'avantage	Métiers
Permet de détecter davantage de problèmes	5/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons
Moins de modifications	4/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons
Gains financiers	3/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons
Plus difficile de se projeter en CAO	3/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons
Visualisation d'un produit à l'échelle 1	3/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons

4.2.3. Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement

En plus de son utilité, nous avons également relevé des qualités de la réalité virtuelle qui étaient perçues positivement par les utilisateurs (Tableau 18) (48 références). Six des huit utilisateurs ont mentionné le sentiment de présence qui accompagne l'utilisation de la réalité virtuelle (« *Bah j'avais trouvé ça intéressant, c'était surtout pour se mettre à la place, et puis là on voyait vraiment le produit quoi, on voyait vraiment les pièces en 3D. On avait l'impression qu'on pouvait les toucher* », compagnon C). La facilité d'utilisation de la technologie a également été pointée (« *C'était assez facile* », compagnon D), mais seulement par deux utilisateurs, et pour le visio-casque uniquement. Nous reviendrons sur ce point dans les limites de la réalité virtuelle. Les caractéristiques matérielles du visio-casque – le fait qu'il soit portable et son confort – ont également été évoquées par deux utilisateurs (« *Le casque, c'est plus pratique, ça permet de le faire du moment qu'on a une salle plus ou moins grande* », chargé d'affaires).

Tableau 18. *Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement*

Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement	Nombre d'utilisateurs évaluant positivement cette caractéristique	Métiers	Dispositifs évalués
Présence	6/8	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons	CAVE et visio-casque
Facilité d'utilisation	2/8	Chargé d'affaires, compagnon	Visio-casque

Matériel léger et casque confortable	2/8	Chargé d'affaires, compagnon	Visio-casque
--------------------------------------	-----	------------------------------	--------------

4.2.4. Limites de la réalité virtuelle dans les projets

Les utilisateurs ont par ailleurs mentionné des limites à l'utilisation de la réalité virtuelle dans les projets (185 références). Nous les avons classés en trois catégories.

La première catégorie de limites concerne les défauts de la technologie (Tableau 19) (44 références). Le plus mentionné par les utilisateurs est son manque d'utilisabilité. Il est relevé principalement pour les utilisateurs du CAVE, qui ont eu des difficultés à utiliser la manette (« *Ce qui me semble difficile c'est la prise en main de ce que j'appellerais le joystick* », compagnon A). Cet aspect a également été mentionné pour le visio-casque, mais uniquement par le compagnon C (« *On cherchait un petit peu les boutons* »). De plus, ce manque d'utilisabilité des dispositifs de contrôle requerrait un temps d'apprentissage important pour les utilisateurs (« *Pour quelqu'un qui arrive et qui n'a jamais fait, c'est vraiment pas évident. Il faut vraiment un temps d'adaptation assez suffisant* », compagnon B).

Par ailleurs, le compagnon B a rapporté des symptômes de mal des environnements virtuels dans le CAVE (« *Il y a un moment je commençais à avoir un petit mal de tête qui montait, je me suis dit bon allez c'est bien on arrête, on en a vu assez pour aujourd'hui* »), et le compagnon D a relevé que le fil du visio-casque était gênant (« *On avait besoin de l'assistance de quelqu'un pour prendre le câble. Ça oui, ça serait un plus de ne pas l'avoir. Je sais pas, peut-être depuis ça a changé* »).

Tableau 19. Défauts de la technologie

Défauts de la technologie	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce défaut	Métiers	Dispositifs évalués
Difficile à utiliser	5/8	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons	CAVE et visio-casque
Temps d'apprentissage des commandes important	4/8	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons	CAVE et visio-casque
Mal des environnements virtuels	1/8	Compagnon	CAVE
Câble du casque gênant	1/8	Compagnon	Visio-casque

La deuxième catégorie de freins que nous avons identifiés étaient des freins relatifs aux projets de conception (Tableau 20) (48 références). Le premier frein est le coût des sessions, qui avait d'ailleurs été pointé par le chargé d'affaires lors de notre premier entretien. Suite aux sessions, il a été mentionné par deux compagnons et par le préparateur A (« *Après voilà ça, après je pense que ça a un coût au niveau du développement. Et il faut un budget pour ça je pense et puis il faut qu'il soit intégré* », compagnon A).

Les utilisateurs ont également critiqué les pertes de temps pendant les sessions, qui peuvent gêner la progression de la revue de projet (« [Besoin d'être formé à l'utilisation du visio-casque] *Comme ça on ne perd pas de temps à chercher, on se concentre vraiment sur le produit en lui-même* », compagnon C).

Enfin, ils ont soulevé que l'intégration de la réalité virtuelle aux projets de conception pourrait être freinée par des personnes qui la rejetteraient (« *Il y a toujours des gens que ça rebute un peu. Il y en a qui ne veulent pas s'embêter à aller vers ce genre de trucs peut-être* », chargé d'affaires).

Tableau 20. *Freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception*

Freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce frein	Métiers
Coût	3/7	Compagnons, préparateur
Perte de temps pendant les sessions	3/7	Compagnons, préparateurs
Personnes réfractaires	3/7	Chargé d'affaire, préparateurs, compagnons

Nous avons identifié une dernière catégorie de limites à l'utilisation de la réalité virtuelle, que les utilisateurs ont exprimées sous la forme de besoins pour les sessions futures (Tableau 21) (93 références). D'abord, ils ont mentionné deux aspects positifs de ces sessions, qui nécessitent d'être maintenus dans les sessions futures. Il s'agit de la participation de différents métiers lors des sessions (« *C'est intéressant de mettre tous les métiers ensemble ce jour-là* », compagnon B), et notamment des compagnons (« *Leur avis est quand même important vu que c'est eux qui vont travailler dessus* », chargé d'affaires). Les utilisateurs ont également évoqué des métiers qui n'avaient pas été inclus dans ces sessions (« *L'outillage en a besoin pour définir son outillage, mais l'ergonome il en a aussi besoin pour s'assurer que les compagnons sont dans de bonnes conditions* », préparateur B).

Pour les futures sessions, les utilisateurs ont exprimé le besoin que les outils soient représentés dans l'environnement virtuel (« *Ce qu'on disait aussi c'est que l'idée c'est de pouvoir avoir des outils, c'est-à-dire que le compagnon s'il veut avoir modélisés des accès ou des choses comme ça, c'est d'avoir une bibliothèque d'outillages* », préparateur B). Les utilisateurs de la seconde session ont par ailleurs évoqué le besoin de modifier l'environnement virtuel pendant la session (« *La chose qui m'a embêté c'est qu'à un moment on voulait faire un essai avec un plancher plus haut de dix centimètres, et je m'en rappelle, on l'avait simulé en réel, on avait mis des dictionnaires ou je ne sais plus ce qu'on avait mis, et je pense que c'était juste un petit problème technique, mais ça si on pouvait le faire à l'ordinateur, c'est vraiment le truc à améliorer* », compagnon C).

Les compagnons ont également regretté d'avoir eu peu d'informations sur le projet avant les sessions. Pour comprendre plus rapidement les projets et pour pouvoir prendre plus facilement part aux évaluations des postes, ils ont besoin d'explications du projet en amont (« *J'aurais bien aimé le voir déjà en premier en 2D, sur une feuille,*

sur un écran, qu'on me le présente une première fois avant et qu'on y aille une deuxième fois au moins en connaissant déjà l'élément, en l'ayant vu déjà une première fois sur un écran, et après revenir et puis le revoir en 3D, et là je pense qu'on aurait encore plus apprécié la différence. Parce que là j'ai vraiment découvert l'élément ce jour-là », compagnon B). Ils ont également souligné qu'il est nécessaire pour eux de garder une trace des évaluations et des décisions prises lors des sessions ; ils craignent qu'elles ne soient pas toutes prises en compte (« Il faut que les informations qui ont été dites ce jour-là remontent bien à bon entendeur. Sinon, ça sert à rien. On travaille dans le vide », compagnon B). Ils aimeraient également être informés des modifications apportées aux postes suite aux sessions (« Après ça serait bien d'avoir un peu le retour de ce qui a été pris en compte ou pas », compagnon C).

Les préparateurs et le chargé d'affaires ont exprimé le besoin de pouvoir passer facilement d'une maquette CAO à un environnement virtuel, ce qui demande aujourd'hui de formaliser l'environnement virtuel par le biais d'un logiciel supplémentaire (RHEA pour le CAVE, et SkyReal pour le visio-casque) (« Pour moi l'outil parfait ça serait de pouvoir l'utiliser en utilisant CATIA », chargé d'affaires).

Enfin, la participation d'un ergonome aux sessions a été mentionnée (« C'est dommage c'était que notre ergonome n'était pas là, [ergonome], qui lui aurait pu nous dire bah ça on sait faire, ça c'est pas possible. Parce que lui voilà c'est son métier », compagnon A).

Tableau 21. Besoins pour les sessions futures

Besoin pour les sessions futures	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce besoin	Métiers
Impliquer différents métiers	6/7	Chargé d'affaires, préparateurs, compagnons
Nécessité d'impliquer les compagnons	4/7	Chargé d'affaires, préparateurs, compagnons
Représenter les machines	5/7	Chargé d'affaires, préparateurs, compagnons
Modifier l'environnement virtuel pendant la session	3/7	Préparateur, compagnons
Explications du projet en amont	3/7	Compagnons
Garder une trace des évaluations et des décisions	2/7	Compagnons
Être informé des modifications apportées suite aux sessions	2/7	Compagnons
Faciliter l'intégration entre la CAO et la réalité virtuelle	2/7	Chargé d'affaires, préparateur

Besoin pour les sessions futures	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce besoin	Métiers
Faire participer un ergonome	2/7	Compagnon, préparateur

4.2.5. Comparaison entre visio-casque et CAVE

Le chargé d'affaires et le préparateur A ont utilisé à la fois le CAVE et le visio-casque, puisqu'ils ont participé aux deux sessions. Ils ont comparé ces deux dispositifs (Tableau 22) (10 références).

Pour le chargé d'affaires, il serait plus facile d'organiser des sessions avec un visio-casque qu'avec le CAVE, car cela ne nécessiterait pas de se déplacer à IndustriLAB, de réserver le CAVE et de faire appel aux chargés de réalité virtuelle (« *Je trouve que c'est plus... je vais pas dire facile, les moyens à utiliser ils sont plus light [...] parce que le CAVE il faut prendre rendez-vous avec tout le monde, faut se rendre là-bas, faut que quelqu'un pilote la machine* », chargé d'affaires).

Pour lui, le CAVE est à privilégier pour représenter des zones étendues (« *Pour moi c'est [le visio-casque] largement suffisant, après on pourrait se permettre d'utiliser le CAVE quand, par exemple, on aurait commencé à installer. Par exemple on aurait mis le bâtiment 13 dans le CAVE, là on aurait fait une balade dedans* ») ou des éléments en fin de conception (« *Dans le CAVE ça serait le truc vraiment final* »). Dans le même ordre d'idées, pour le préparateur A, le rendu de l'espace est meilleur dans le CAVE (« *Par contre on a moins l'effet peut-être d'espace que dans le CAVE* », préparateur A).

En revanche, leurs avis divergeaient sur la résolution des deux dispositifs. Pour le chargé d'affaires, le CAVE a une meilleure résolution (« *Le rendu [du visio-casque], il est quand même vachement intéressant, je veux dire c'est peut-être pas le niveau du CAVE* »), alors que pour le préparateur A, c'est le visio-casque (« *En fait la différence, entre les deux méthodes, le casque au niveau visuel, j'ai l'impression que ça rend plus, ça a un meilleur rendu* »).

Tableau 22. Points de comparaison entre le visio-casque et le CAVE

Points de comparaison entre le visio-casque et le CAVE	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce besoin	Métier
Visio-casque plus facile à intégrer	1/2	Chargé d'affaires
Visio-casque offre une meilleure résolution	1/2	Préparateur
CAVE offre meilleur rendu de l'espace	1/2	Préparateur
CAVE avantageux pour représenter une zone étendue	1/2	Chargé d'affaires
CAVE offre une meilleure résolution	1/2	Chargé d'affaires

4.2.6. Critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception

Enfin, nous avons mis en évidence des critères de décisions pour l'intégration de la réalité virtuelle aux projets de conception (Tableau 23) (72 références). Pour commencer, les personnes interrogées ont expliqué qu'elles utiliseraient la réalité virtuelle pour des projets nouveaux (« *Sur des nouveaux projets. Demain on refait un nouveau bâti, on l'utiliserait* », préparateur A) ou pour la modification d'un poste existant (« *Je pense que même en cours d'utilisation un bâti peut encore être modifié, donc je pense que c'est même important d'aller simuler des essais de modification sur un bâti* », compagnon D).

Pour le chargé d'affaires et le compagnon D, la réalité virtuelle est utile pour tous les projets (« *Bah du moment qu'on fait un poste de travail on va dire d'une certaine dimension, pour moi c'est intéressant de l'utiliser* », chargé d'affaires), alors que pour les autres compagnons elle est inutile pour évaluer des postes existants (« *Bah sur des projets qui existent déjà. C'est pas utile de présenter ça sur des trucs qui sont déjà existants en dur. Autant aller directement dessus et puis se concentrer dessus et puis en parler ensemble autour du bâti* », compagnon B).

Pour le chargé d'affaires et le compagnon D, elle est utile dès les phases d'avant-projet, pour pouvoir évaluer le poste dans ses grandes lignes, avant de procéder à des évaluations plus complètes (« *C'est un outil que j'utiliserais dès les phases d'avant-projet* », chargé d'affaires).

Enfin, pour le chargé d'affaires et le préparateur B, son utilisation devrait être imposée (« *Qu'on se l'impose en interne, mais que ce soit entre guillemets un automatisme* », préparateur B).

Tableau 23. Critères de décision pour l'intégration de la réalité virtuelle à un projet de conception

Critères de décision	Nombre d'utilisateurs mentionnant ce besoin	Métiers
Poste nouveau	4/7	Préparateurs, compagnons
Modification d'un poste existant	4/7	Préparateurs, compagnons
Utile pour tous les projets	2/7	Chargé d'affaires, compagnon
Inutile sur poste existant	3/7	Compagnons
En phase d'avant-projet	2/7	Chargé d'affaires, compagnon
Devrait être obligatoire	2/7	Chargé d'affaires, préparateur

4.3. Usage réel de la réalité virtuelle pour la revue de projet

Nous avons recueilli trois types de données lors des sessions en réalité virtuelle : les comportements des utilisateurs, les dysfonctionnements et les difficultés qu'ils rencontrent, ainsi que leurs communications.

4.3.1. Comportement des utilisateurs lors des sessions en réalité virtuelle

Pour commencer, nous nous sommes intéressée au partage de la manette du CAVE lors de la première session et au partage du visio-casque lors de la seconde. La manette du CAVE a été partagée majoritairement entre quatre utilisateurs : le chargé de réalité virtuelle (33 min 33, soit 41 % de la durée de la session), le préparateur A (23 min 14, soit 29 %), le compagnon B (10 min 30, soit 13 %) et le préparateur D (9 min 57, soit 12 %). Lors de la seconde session, le visio-casque a été majoritairement porté par le compagnon C (57 min 36, soit 37 %), le compagnon D (44 min 55, soit 29 %) et le préparateur A (26 min 56, 17 %).

Nous nous sommes ensuite intéressée aux fonctionnalités utilisées lors de ces sessions. Dans l'étude précédente, nous présentions des résultats combinés des deux sessions en réalité virtuelle, puisqu'elles étaient toutes les deux conduites dans le CAVE. Pour cette étude, un visio-casque a été utilisé en seconde session. Ses fonctionnalités étaient différentes de celles du CAVE. Pour cette raison, nous ne présenterons pas de résultats généraux pour les deux sessions, mais nous présenterons séparément les résultats pour chacune des sessions.

La Figure 32 synthétise les fonctionnalités utilisées lors de la première session. Lors de la session dans le CAVE, les utilisateurs se sont majoritairement déplacés dans l'environnement virtuel et ils ont parcouru les menus. Nous notons également qu'ils ont utilisé d'autres fonctionnalités ponctuellement : la prise de mesure, l'utilisation de la lampe torche et le traçage de tuyauterie.

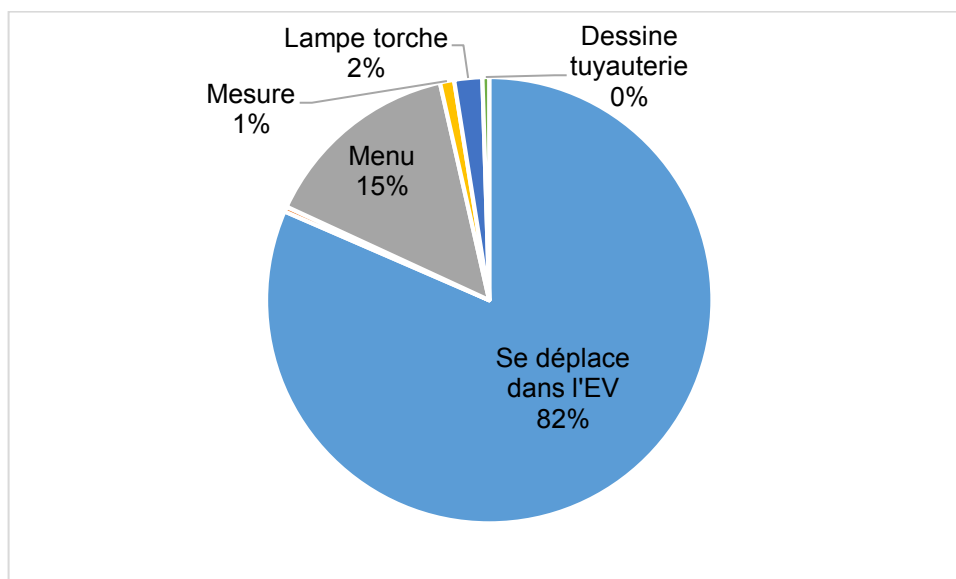


Figure 32. Fonctionnalités utilisées lors de la première session²¹

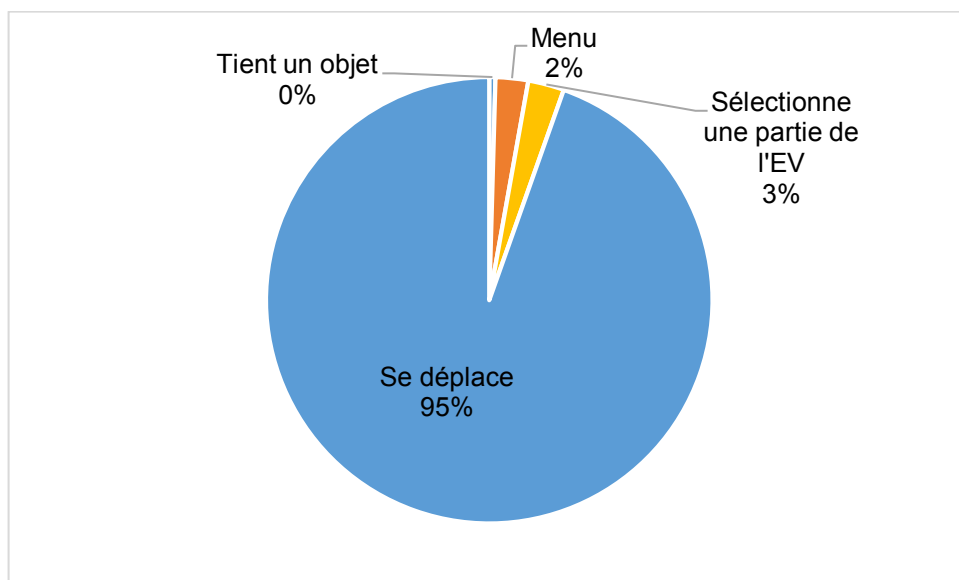


Figure 33. Fonctionnalités utilisées lors de la seconde session

La Figure 33 résume les fonctionnalités utilisées lors de la seconde session. Les utilisateurs ont presque exclusivement navigué dans l'environnement virtuel ; les déplacements représentent 95 % des fonctionnalités utilisées. Les autres fonctionnalités ont été utilisées ponctuellement : il s'agissait de la navigation dans les menus, de la sélection d'une partie de l'environnement virtuel et de la saisie d'objet. Lors de cette session, nous avons également relevé les comportements des utilisateurs dans le monde physique. Nous avons relevé les comportements suivants :

- Les participants ont tenu le fil du casque (pendant 1 h 44, soit 67 % de la session).
- Les participants sont montés sur une pile de livres pour simuler le fait de baisser la hauteur du poste (pendant 10 min, soit 6 % de la session).
- Les participants se sont assis sur une chaise pour simuler un siège dans l'environnement virtuel (4 min, soit 2 % de la session).
- Les participants ont pris la mesure de l'épaisseur des livres avec un mètre (3 s).

4.3.2. Dysfonctionnements et difficultés de manipulation

Nous avons également relevé les dysfonctionnements et les difficultés de manipulation des utilisateurs pendant les sessions, qui témoignent d'un manque d'utilisabilité de la technologie, et par conséquent d'un manque d'acceptabilité

²¹ Dans les figures, la proportion de temps d'utilisation est égale à 0 % pour certaines fonctionnalités ; elles ont bien été utilisées, mais pour des durées très faibles qui n'équivalent pas à 1 % de la durée totale du codage. Pour cette raison, les figures indiquent 0 %.

pratique. Nous avons relevé quatre dysfonctionnements pendant la première session et trois pendant la seconde. Le Tableau 24 synthétise ces dysfonctionnements.

Tableau 24. *Dysfonctionnements relevés lors des deux sessions en réalité virtuelle*

Session	Description du dysfonctionnement
Session 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lunettes qui ne permettent pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel 2. Utilisateur qui ne parvient à monter un escalier 3. Chargé de RV qui ne parvient pas à accéder au menu pour faire une capture 4. Lunettes qui ne permettent pas une vision stéréoscopique de l'environnement virtuel
Session 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Poste à distance et ne parvient pas à se déplacer 2. Passerelle sélectionnée qui se désélectionne lorsque chargé de RV essaie de la déplacer 3. Utilisateur essaie de sélectionner un panneau, mais plusieurs éléments sont sélectionnés

Nous avons également répertorié des passages indiquant des difficultés de manipulation pour les utilisateurs. Nous en avons compté au total huit : quatre pour la première session et une pour la seconde. Le Tableau 25 les décrit.

Tableau 25. *Difficultés de manipulation relevées lors des deux sessions en réalité virtuelle*

Session	Description de la difficulté de manipulation
Session 1	<ol style="list-style-type: none"> 1. Chute du bâti 2. Chute du bâti 3. Chute du bâti 4. Difficultés à se déplacer en étant sous le bâti
Session 2	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisateur essaie de sélectionner passerelle, qui avaient été écartées, pour les remettre en place. Opte ensuite pour redémarrage de l'environnement virtuel

4.3.3. Communications lors des sessions en réalité virtuelle

Nous présenterons dans cette section l'analyse des communications lors des sessions en réalité virtuelle. Lorsque nous avons combiné les données des deux sessions (Figure 34), la catégorie Revue de projet comprenait le plus de références

(879 références, 62 %), suivie de la catégorie Utilisation de la technologie (336 références, 23 %).

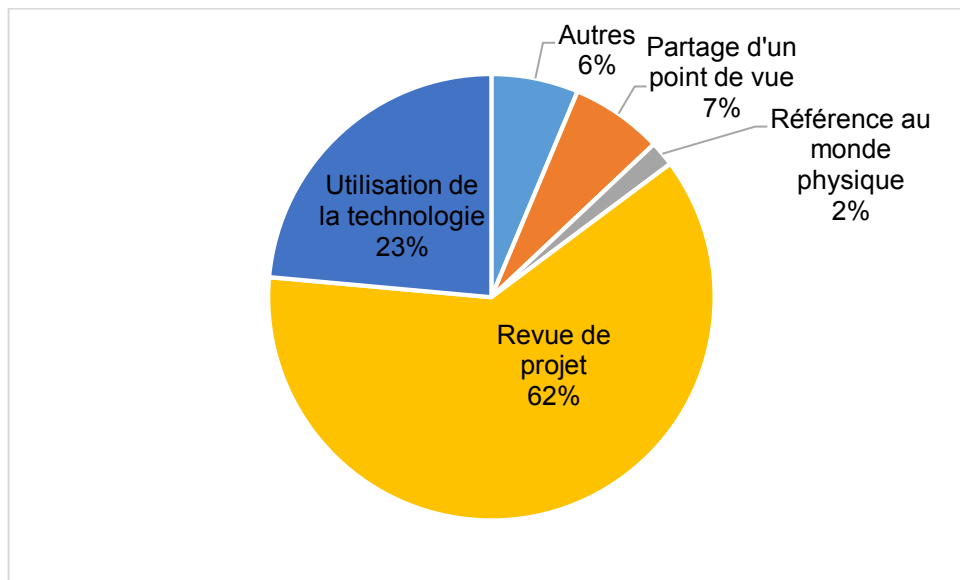


Figure 34. Répartition des catégories de communications lors des deux sessions combinées

Nous avons retrouvé cette répartition des communications pour la session 1 (Figure 35). La catégorie Revue de projet comporte 368 références et représente 53 % des communications. La catégorie Utilisation de la technologie comprend 204 références et représente 30 % des communications. Il faut également noter que les communications relatives au partage d'un point de vue représente 11 % des communications (73 références).

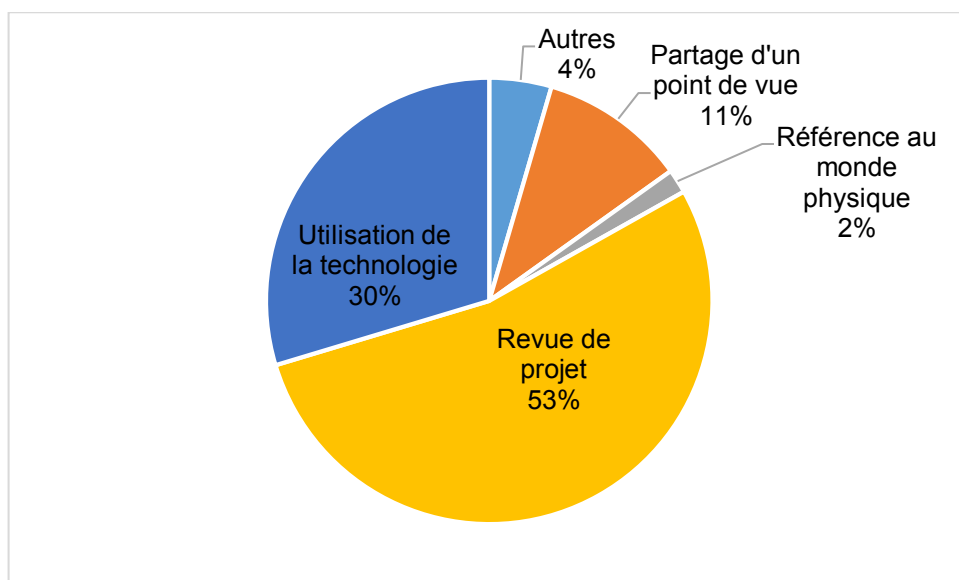


Figure 35. Répartition des catégories de communications lors de la première session

Si nous nous arrêtons sur les codes qui composent ces catégories, nous notons que les codes les plus représentés sont les évaluations du poste (114 références, 16 %), les explications sur les futures tâches (98 références, 14 %) et les injonctions (89 références, 13 %) pour cette première session. Les utilisateurs qui se sont le plus

exprimés sont le préparateur A (186 références, 27 %) et le chargé de réalité virtuelle (156 références, 22 %). Le premier a majoritairement expliqué les futures tâches (57 références, 31 %), alors que le second a donné des explications sur la réalité virtuelle et sur les fonctionnalités du logiciel RHEA (36 références, 23 %), et énoncé des injonctions (32 références, 21 %).

Lors de la seconde session, les codes que nous avons le plus fréquemment relevés étaient les explications sur les futures tâches (116 références, 16 %) et les évaluations de solutions de conception (91 références, 12 %). Les utilisateurs s'étant le plus exprimés sont le compagnon B (205 références, 28 %), le chargé d'affaires outillage (167 références, 22 %) et le préparateur A (150 références, 20 %). Pour le compagnon B, les communications que nous avons relevées sont majoritairement des questions sur les futures tâches (43 références, 21 %) et des évaluations des solutions proposées (32 références, 16 %). Pour le chargé d'affaires, il s'agissait des explications sur les futures tâches (24 références, 14 %), des évaluations des solutions proposées (24 références, 14 %) et des explications sur la configuration du poste ou de l'élément avion (23 références, 14 %). Pour le préparateur A, les communications les plus nombreuses étaient des explications sur les futures tâches (73 références, 49 %) et des explications sur la configuration du poste ou de l'élément avion (18 références, 12 %).

5. DISCUSSION

Cette étude répondait à deux objectifs. Il s'agissait, d'une part, de comprendre comment des utilisateurs de la réalité virtuelle percevaient cette technologie et, d'autre part, d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'usage réel de la technologie.

Nous avons conduit cette étude lors d'un projet de conception de nouveaux postes d'assemblage. Au total, une demi-douzaine de postes ont été conçus dans le cadre de ce projet. Nous avons observé deux sessions en réalité virtuelle, qui portaient sur trois postes. La première avait lieu dans le CAVE d'IndustriLAB et portait sur un poste, la seconde mobilisait un visio-casque et portait sur deux autres postes. Nous avons également conduit des entretiens avec les participants à la suite de ces sessions. Avant de discuter des principaux résultats de cette étude, nous nous arrêterons sur les principales caractéristiques de ces deux sessions.

5.1. Deux sessions en réalité virtuelle sur des postes et avec des dispositifs différents, mais relativement proches dans leurs contenus

Pour commencer, les postes traités lors des deux sessions s'inscrivaient dans des phases différentes du processus de conception. Celui de la première session et le premier traité lors de la seconde étaient en phase de fin de conception ; les principales décisions de conception avaient donc été prises, mais ils restaient des marges de manœuvre suffisantes au chargé d'affaires pour apporter des modifications. Le dernier poste était en phase plus en amont du projet, ce qui laissait la possibilité aux participants de faire des modifications importantes pendant les sessions.

Cette différence entre les postes s'observe dans les contenus des communications. Les communications de la première session comprenaient majoritairement des évaluations du poste et des explications sur les futures tâches, alors que les communications de la seconde session comprenaient une part

importante d'explications sur les futures tâches, mais aussi des évaluations de solutions de conception proposées par les participants. En revanche, la répartition des communications d'un point de vue macroscopique, c'est-à-dire lorsque nous les traitons par catégories, ne varie pas d'une session à l'autre : elles concernent principalement la revue de projet, l'utilisation de la réalité virtuelle arrivant en second.

Il faut noter par ailleurs que les participants de la seconde session étaient davantage autonomes dans l'utilisation du visio-casque, par comparaison aux participants de la première session, dans le CAVE. Dans la première session, le chargé de réalité virtuelle a passé 58 % de la session dans le CAVE, alors que le chargé de réalité virtuelle de la seconde session a porté le casque moins d'une minute (ce qui représente moins d'un pourcent de la durée de la session). Cette différence s'observe également dans les communications : lors de la première session, le chargé de réalité virtuelle fait partie, avec le préparateur A, des personnes qui se sont le plus exprimés, alors que le chargé de réalité virtuelle de la seconde session s'est peu exprimé.

5.2. Discussion des principaux résultats

Les résultats obtenus dans cette étude nous ont permis d'identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans les projets de conception, que nous résumons dans le Tableau 26.

Tableau 26. *Facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle identifiés dans les perceptions des utilisateurs et dans l'usage de la technologie*

	Facteurs d'acceptation	Facteurs de rejet
Perceptions des utilisateurs	Utilité pour la revue de projet Avantages face à la CAO Critères de décision pour l'intégration à un projet : projet nouveau, modification de poste, voire pour tous les projets, inutile sur des postes existants Caractéristiques de la réalité virtuelle perçues positivement : présence, facilité d'utilisation, matériel léger et confortable	Défauts de la technologie Freins à l'intégration relatifs à la conduite des projets Besoins non satisfaits
Usage	Utilité objective : activité de conception avec réalité virtuelle Rôle des compagnons dans le processus de conception	Dysfonctionnements Difficultés de manipulation (manque d'utilisabilité) Impossibilité de modifier la maquette en temps réel

5.2.1. Facteurs d'acceptation identifiés dans les perceptions des utilisateurs

L'utilité de la réalité virtuelle est le facteur d'acceptation le plus mentionné par les utilisateurs. La réalité virtuelle est jugée utile pour différentes raisons dans ce projet. Pour tous les participants à la revue de projet, elle permet d'évaluer le poste et de

simuler des postures. Pour le chargé d'affaires et les préparateurs, elle permet également de prendre des décisions de conception, en s'appuyant sur les évaluations faites pendant les sessions. Les compagnons ont souligné quant à eux l'intérêt de la réalité virtuelle pour proposer des solutions de conception. Nous reviendrons sur le rôle des compagnons dans les sessions lorsque nous présenterons les facteurs d'acceptation de la réalité virtuelle que nous avons identifiés dans l'utilisation effective.

Ces résultats rejoignent les études en situation réelle de revue de projet en industrie, qui mettent en évidence que la réalité virtuelle est jugée utile pour évaluer les produits conçus et prendre des décisions de conception (Benness, 2013; Berg & Vance, 2017a; Y. Liu et al., 2014; Wolfartsberger, 2019). Ces résultats sont également en accord avec les études sur l'acceptabilité sociale des technologies, qui identifient l'utilité perçue comme la plus prédictive des intentions d'usage (Davis, 1989; King & He, 2006; Lee et al., 2003). Ce rôle de l'utilité perçue a d'ailleurs également été montré pour les environnements virtuels (e.g., Bertrand & Bouchard, 2008; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Isler, 2013).

Dans nos analyses, nous avons distingué le médecin du travail des autres utilisateurs. En effet, elle jugeait également la réalité virtuelle utile, mais pour des objectifs différents. Elle a participé à la session pour prendre connaissance du poste et pouvoir affecter en toute connaissance de cause du personnel en restriction médicale aux postes conçus. Pour cette raison, le reste de la discussion de nos résultats sera centré sur les autres utilisateurs, qui participaient à une revue des postes conçus.

Les bénéfices de la réalité virtuelle sur la CAO sont à considérer comme un facteur d'acceptation de la réalité virtuelle. Pour les utilisateurs, la réalité virtuelle permet de détecter davantage de problèmes de conception et de faire moins de modifications sur les postes une fois implantés, ce qui permet également des gains financiers. Dans l'étude de Liu et al. (2014), dans le domaine de la construction, les utilisateurs relèvent eux aussi que la réalité virtuelle leur permet de détecter davantage de problèmes que les outils qu'ils utilisent habituellement. Par ailleurs, les utilisateurs de notre étude ont rapporté qu'il leur était plus difficile de « se projeter » dans une maquette CAO et qu'un des avantages de la réalité virtuelle est de présenter des éléments à l'échelle 1. Là aussi, ces éléments ont été relevés antérieurement dans les études sur l'utilisation de la réalité virtuelle en situation réelle de conception. Les utilisateurs de ces études rapportent une meilleure compréhension des distances et des volumes en réalité virtuelle (Berg & Vance, 2017a; Liu et al., 2014) et pointent l'avantage d'une visualisation des éléments à l'échelle 1 (Berg & Vance, 2017a).

Les utilisateurs ont par ailleurs expliqué que leur décision d'utiliser ou non la réalité virtuelle reposait sur certaines caractéristiques des projets de conception. Cette technologie est selon eux utile pour des postes nouveaux et pour des projets de modification de poste²². Pour deux des utilisateurs interrogés, elle est utile dans tous les projets. Pour les compagnons, elle est en revanche inutile pour les projets de modification de postes existants, pour lesquels ils recommandent plutôt de réaliser des études sur les postes. Le chargé d'affaires juge par ailleurs que la réalité virtuelle devrait être intégrée rapidement dans les projets, en phase d'avant-projet, pour avoir suffisamment de marges de manœuvre pour apporter des modifications. Il s'accorde

²² Ce sont les deux types de projets que nous avons d'ailleurs observés dans ce travail de recherche.

également avec les préparateurs pour dire que la réalité virtuelle devrait être obligatoire et intégrée comme une étape de validation des projets.

Enfin, nous notons que certaines caractéristiques de la réalité virtuelle sont perçues positivement. D'abord, la majorité des utilisateurs a mis en avant le sentiment de présence qu'ils avaient ressenti pendant l'utilisation. Deux utilisateurs seulement ont évoqué la facilité d'utilisation de la technologie, et uniquement pour le visio-casque. Le manque d'utilisabilité a été davantage pointé ; nous y reviendrons dans les freins à l'utilisation de la réalité virtuelle. Deux utilisateurs ont également pointé le confort du visio-casque. Ces résultats sont à rapprocher de ceux de la littérature. En effet, des études antérieures ont montré un effet de la présence sur l'acceptabilité sociale de la réalité virtuelle et des environnements virtuels (Hou et al., 2019; Shin et al., 2013). De plus, la facilité d'utilisation est considérée comme une variable centrale des modèles d'acceptabilité sociale, et elle prédit de manière indirecte les intentions d'usage des technologies par le biais de l'utilité perçue (Davis et al., 1989; Lee et al., 2003; Yousafzai et al., 2007a). Enfin, pour Stanney et al. (2003), le confort des équipements est une caractéristique à prendre en compte, à la fois pour garantir l'utilisabilité des technologies de réalité virtuelle, mais aussi, car l'inconfort de l'utilisateur pourrait surpasser ses autres sensations lors de l'interaction et la dégrader. Pourtant, dans l'étude de Herz et Rauschnabel (2019), cette variable prédit faiblement les attitudes envers la technologie et les utilisateurs lui accordent peu d'importance dans leur décision d'achat.

5.2.2. Facteurs de rejet identifiés dans les perceptions des utilisateurs.

Les entretiens conduits nous ont également permis d'identifier des facteurs de rejet. Les premiers concernent les défauts de la technologie, et surtout le manque d'utilisabilité de la manette dans le CAVE. Les utilisateurs ont rapporté que, de manière générale, la manette était difficile à utiliser et que l'apprentissage des commandes prenait du temps. Pour les utilisateurs, ce manque d'utilisabilité entraînait une perte de temps lors des sessions ; ils ont alors proposé des solutions pour les sessions futures, par exemple, d'être formés à l'utilisation des technologies avant l'immersion (« *Comme ça on ne perd pas de temps à chercher, on se concentre vraiment sur le produit en lui-même* », compagnon C).

Les approches théoriques de l'acceptabilité accordent un rôle important à l'utilisabilité dans l'adoption des technologies. Par exemple, dans le modèle d'acceptabilité de Nielsen (1993), l'acceptabilité d'une technologie est expliquée par son acceptabilité pratique, qui renvoie à son efficacité, la facilité pour les utilisateurs d'apprendre à utiliser, la prévention des erreurs, etc. Pour les modèles d'acceptabilité sociale, la facilité d'utilisation perçue est considérée comme une variable centrale, aux côtés de l'utilité perçue, dans la prédiction des intentions d'usage (Legris et al., 2003; Yousafzai et al., 2007a).

Le rôle du manque d'utilisabilité de la réalité virtuelle dans le contexte de cette étude est à questionner. En effet, dans les deux sessions observées, les utilisateurs étaient accompagnés de chargés de réalité virtuelle qui pouvaient les assister dans l'utilisation : soit par des injonctions (comme celles que nous relevons dans l'analyse des communications), soit par des manipulations (comme nous les indiquons lorsque nous précisons dans quelle proportion les participants ont tenu la manette). Les chargés de réalité virtuelle ont alors pu compenser les défauts d'utilisabilité des

technologies pour ces deux sessions. Le manque d'utilisabilité a été pointé par les utilisateurs qui ont proposé des améliorations pour les sessions futures, sans écarter la possibilité de nouvelles sessions.

Les utilisateurs ont également rapporté certains freins relatifs à la conduite même des projets. Le premier est le coût. En effet, au moment où l'étude a été conduite, le recours à la réalité virtuelle demandait aux responsables de projet de louer une salle et du matériel, ce qui peut empêcher l'intégration de la réalité virtuelle si ces coûts n'avaient pas été pris en compte dans les budgets. Les utilisateurs ont également mentionné le temps perdu pendant les sessions à cause du manque d'utilisabilité des technologies, ainsi que les personnes qui pourraient rejeter cette technologie, soit en choisissant de ne pas participer aux sessions en réalité virtuelle quand ils y sont invités, soit en choisissant de ne pas inclure de réalité virtuelle dans leurs projets.

Certains besoins ont par ailleurs été pointés par les utilisateurs. Ces besoins illustrent des manques dans les sessions conduites, pour lesquels les utilisateurs ont proposé des améliorations pour les sessions futures. En premier lieu, la majorité des utilisateurs a mentionné le besoin de représenter les outils qui vont être utilisés. L'objectif serait de simuler véritablement l'accès des outils dans certaines zones, au lieu de l'évaluer par le biais d'autres indices, comme par la perception des distances.

Ils ont également mentionné la nécessité de pouvoir modifier l'environnement virtuel pendant la session. Lors des deux sessions observées, des solutions à des problèmes de conception ont été proposés sans que les utilisateurs ne puissent les implanter et les évaluer à l'aide de l'environnement virtuel. Lors de la seconde session, cette limite des logiciels utilisés a été contournée en utilisant une pile de livres pour simuler un changement dans la hauteur du poste. Nous y reviendrons dans les freins identifiés dans l'usage.

Enfin, les compagnons ont exprimé le besoin d'avoir davantage d'informations sur les postes avant les sessions. Les sessions telles qu'elles ont été organisées demandent à la fois aux compagnons de s'orienter dans l'espace, de comprendre l'organisation spatiale du poste et des opérations, l'organisation temporelle du process et de pouvoir évaluer le poste et proposer des solutions. Une étude de van der Land et al. (2013) montre d'ailleurs qu'alors que l'utilisation d'un environnement virtuel immersif permet une bonne compréhension d'un produit à un niveau individuel, elle entraîne une augmentation de la charge cognitive des utilisateurs, par comparaison à une présentation en 2D ou en 3D statique de ce même produit. Dans les critères ergonomiques qu'ils ont définis pour la conception et l'évaluation des environnements virtuels, Bach et Scapin (2005) recommandent de limiter la charge cognitive des utilisateurs. Bobillier Chaumon (2013, 2016) identifie également le coût cognitif de l'usage d'une technologie comme un facteur de rejet. Pour cette raison, nous pensons que les compagnons, et de manière générale l'ensemble des utilisateurs, pourraient être plus efficaces dans leurs évaluations s'ils possédaient davantage d'informations sur le poste préalablement aux sessions.

Les compagnons ont également évoqué le besoin de garder une trace des évaluations et d'être informés des modifications apportées suite aux sessions en réalité virtuelle. Un des préparateurs et le chargé d'affaires ont également mentionné la possibilité d'intégrer la CAO plus facilement à des environnements virtuels. L'intégration des maquettes CAO et de la réalité virtuelle permettrait aux outilleurs et aux préparateurs de construire en autonomie les environnements virtuels dont ils ont

besoin. Cela faciliterait leur utilisation de la réalité virtuelle : ils envisagent ainsi une utilisation en autonomie en courtes sessions en début de processus de conception (« *C'est une conversion à faire je pense que ça, si nous on savait le faire, on le ferait. On s'en servirait* », chargé d'affaires).

Enfin, les utilisateurs auraient besoin qu'un ergonome participe aux sessions, afin qu'il puisse évaluer les solutions proposées par les utilisateurs en termes de risques professionnels (ce point a également été mentionnée pendant les sessions).

5.2.3. Facteurs d'acceptation identifiés dans l'usage

Une partie des facteurs d'acceptation de la réalité virtuelle identifiés dans son usage avaient déjà été pointés dans l'étude précédente. Comme pour l'étude précédente, nous mettons en évidence l'utilité objective de la technologie dans la revue de conception. L'environnement virtuel prend le statut d'un objet intermédiaire de conception (Jeantet, 1998; Vinck, 2009), qui fait à la fois office de représentations externes des postes et de support de collaboration entre les différents métiers qui participent aux sessions (Barcellini, 2015). Comme pour l'étude précédente, la fonction de l'environnement virtuel comme support de coordination, que Barcellini (2015) attribue également aux objets intermédiaires de conception, est à questionner. Il nous semble que c'est la maquette CAO qui tient ce rôle, puisqu'elle permet, entre autres, aux chargés d'affaires outillages, aux préparateurs et aux fournisseurs de se coordonner autour de la conception des postes.

L'environnement virtuel sert de représentation du futur poste d'assemblage, et de manière générale, du travail futur probable à ce poste et de support de collaboration. Nous avons observé que lors des sessions, les participants visitent les postes et prennent connaissance du process (ce que nous notons par les déplacements et par les explications sur les futures tâches), ils évaluent le poste, ils proposent des solutions de conception et ils évaluent les solutions de conception proposées. L'utilité de la réalité virtuelle dans le projet de conception est par ailleurs relevée par l'ensemble des utilisateurs qui ont pris part à la revue de conception.

La réalité virtuelle donne également du pouvoir aux compagnons, ce qui est à considérer comme un facteur d'acceptation. Nous relevons la participation des compagnons à la fois dans l'analyse de l'utilisation, par le temps qu'ils ont passé à piloter les technologies, mais aussi par les communications analysées, qui mettent en évidence les rôles qu'ils ont occupés. Cahour (2002) décrit trois rôles que peuvent occuper les opérateurs quand ils participent au processus de conception : ils peuvent avoir un rôle co-concepteurs, et faire avancer la conception en proposant des solutions tirées de leur expérience ; un rôle d'évaluateurs, et critiquer les décisions de conception ; un rôle de futurs utilisateurs, qu'on informe sur le futur poste de travail et sur les éléments à assembler. Les compagnons ont occupé dans ces sessions les trois rôles décrits précédemment. En premier lieu, ils ont été vus comme de futurs utilisateurs, comme l'atteste la large proportion d'explications sur les futures tâches. Par ailleurs, ils ont évalué le poste conçu, ce que nous observons par la part importante des évaluations du poste dans les communications. Nous relevons également qu'on leur a donné un rôle de co-concepteurs, par des demandes de solution de conception émises par le chargé d'affaires et les préparateurs, par exemple « *Après, oui, c'est à vous de voir si on peut le descendre, de combien on peut le descendre ?* ». Ce rôle de co-concepteurs était plus marqué lors de la seconde session que lors de la première. Lorsque la première session en réalité virtuelle a eu

lieu, le processus de conception pour le bâti visité virtuellement touchait à sa fin. Les principaux jalons de conception avaient été validés, mais il restait toutefois des marges de manœuvre à l'équipe de conception pour apporter des modifications, alors qu'un des postes traités lors de la seconde session était en phase d'avant-projet, ce qui laissait à l'équipe de larges possibilités de modifications.

Comme lors de notre première étude, nous pouvons considérer que la réalité virtuelle intervient sur différentes dimensions de l'activité, que Bobillier Chaumon (2013, 2016) décrit dans l'acceptation située : la dimension organisationnelle, en permettant à l'équipe de conception de réaliser son activité en évaluant (et en faisant évoluer) le poste conçu ; la dimension professionnelle et identitaire en donnant du pouvoir aux compagnons dans la conception du poste ; et, la dimension interpersonnelle en créant un collectif de travail.

5.2.4. Facteurs de rejet identifiés dans l'usage

Enfin, l'analyse de l'utilisation de la réalité virtuelle nous permet de relever que les dysfonctionnements, le manque d'utilisabilité et l'impossibilité de modifier la maquette pendant les sessions sont des facteurs de rejet, ce qui avait également été pointé par les utilisateurs lors des entretiens.

5.3. Limites de cette étude

Cette étude présente des limites qu'il nous faut relever. La limite principale est d'ordre méthodologique. Les entretiens que nous avons réalisés avec les utilisateurs ont eu lieu plusieurs mois après les sessions en réalité virtuelle. Plusieurs raisons ont entraîné ce délai. Initialement, une troisième session était prévue sur un des postes de la seconde session, en autonomie cette fois-ci, c'est-à-dire sans chargé de réalité virtuelle, et au sein du service outillage. Puisque cette session faisait suite à celle que nous avons observée et devait inclure les mêmes utilisateurs (préparateurs et compagnons), nous avons jugé pertinent de ne réaliser les entretiens qu'à l'issue de cette session. Toutefois, elle a été repoussée à plusieurs reprises, et a finalement été annulée, ce qui nous a obligée à conduire nos entretiens avec plusieurs mois de décalage. La disponibilité des utilisateurs pour ces entretiens a également participé à augmenter le délai. Deux utilisateurs, les préparateurs C et D de la première session, pour ce motif, ont d'ailleurs refusé de participer à la suite de l'étude.

Les entretiens semi-directifs que nous avons conduits portent alors sur les perceptions des utilisateurs plusieurs mois après l'utilisation, et donnent des informations sur les éléments marquants de l'interaction avec la technologie, qui peuvent déterminer les perceptions générales et les intentions de l'utiliser. Toutefois, nous pensons que si les entretiens avaient été conduits peu de temps après les sessions, nous aurions recueilli davantage d'informations à la fois sur des éléments relevant de l'acceptabilité pratique de la réalité virtuelle (avec des références à des moments précis des interactions), mais également sur les suites directes des sessions pour le processus de conception (par exemple, les décisions prises suite aux sessions).

Pour Cahour (2010), l'acceptabilité d'une technologie comprend l'efficacité de l'outil, « mais également comment il est utilisé, avec quel effort, quels impressions et sentiments » (p. 284). Elle propose d'étudier les émotions et les affects de l'expérience utilisateur avec les technologies par des entretiens « re-situants », qui s'inspirent des entretiens d'explicitation et d'auto-confrontation, en centrant le discours

des individus sur ce qu'ils ont vécu, en évitant de les amener à raisonner ou à réévaluer ce qu'ils ont vécu (Cahour, Salembier, & Zouinar, 2016). La confrontation des utilisateurs aux vidéos capturées aurait également pu nous renseigner sur des dimensions affectives et émotionnelles de l'interaction avec la réalité virtuelle.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 2

L'objectif de cette étude était d'identifier des **facteurs d'acceptation et de rejet** de la réalité virtuelle dans un **projet de conception de postes de fabrication**. Nous nous sommes intéressée aux **perceptions** des utilisateurs sur la réalité virtuelle ainsi qu'à **leur utilisation** de cette technologie.

Deux sessions en réalité virtuelle ont été conduites. Le CAVE d'IndustriLAB a été utilisé lors de la première session, et un visio-casque a été utilisé pour la seconde. *A priori* des sessions, nous avons conduit un **entretien semi-directif** avec le **chargé d'affaires outillage** en charge des postes présentés en réalité virtuelle. Suite aux sessions, nous avons conduit de nouveaux entretiens. Au total **huit entretiens** ont été conduits, avec ce chargé d'affaires et avec sept des utilisateurs présents lors des sessions (deux préparateurs, quatre compagnons, et le médecin du travail).

Les données recueillies nous ont permis d'identifier des **facteurs d'acceptation**. En premier lieu, les utilisateurs ont souligné **l'utilité** de la réalité virtuelle dans la revue de projet, car elle leur permet d'évaluer le poste, de simuler des postures et de prendre des décisions de conception. Par ailleurs, ils ont rapporté des **avantages** de la réalité virtuelle face au logiciel de CAO utilisé dans l'entreprise : elle permet une meilleure compréhension des postes présentés, mais aussi de détecter davantage de problèmes de conception, de faire moins de modifications sur les postes une fois implantés, ce qui permet également des gains financiers. En outre, certains utilisateurs ont déclaré s'appuyer sur des **caractéristiques des projets de conception** pour déterminer s'ils auraient recours (ou non) à la réalité virtuelle. Ils considèrent ainsi qu'ils l'utiliseraient dans des projets nouveaux et pour des projets de modification de postes. En revanche, les compagnons considèrent qu'elle est inutile pour des projets de modification de poste, alors que d'autres utilisateurs considère qu'elle est utile pour tous les projets.

Nous relevons également certaines **caractéristiques de la réalité virtuelle qui sont perçues positivement** par les utilisateurs. La majorité des utilisateurs ont rapporté le sentiment de **présence** qu'ils ont ressenti lors des sessions. Seuls deux utilisateurs ont souligné la **facilité d'utilisation** des dispositifs, et seulement pour le visio-casque. Deux utilisateurs ont pointé également le **confort** du visio-casque. Nous montrons également que l'environnement virtuel est utilisé par les utilisateurs comme un **objet intermédiaire de conception** (Jeantet, 1998; Vinck, 2009), c'est-à-dire qu'il est utilisé par les participants à la revue de projet comme une représentation des futurs postes et du travail futur probable à ces postes, mais également comme un support de collaboration entre différents métiers (chargé d'affaires outillage, préparateurs et compagnons).

Enfin, nous pensons que le **rôle des compagnons dans les revues de projet** peut être considéré comme un facteur d'acceptation. En effet, les compagnons ont occupé trois rôles pendant les sessions : celui de futurs utilisateurs, celui d'évaluateurs et celui de co-concepteurs (Cahour, 2002). Le **rôle de co-concepteurs** des compagnons était beaucoup plus marqué dans la seconde session observée, qui a eu lieu lors d'une phase d'avant-projet et qui offrait donc des marges de manœuvre importantes pour la modification des postes.

Nous avons également identifié des **facteurs de rejet** de la réalité virtuelle. Ils sont de trois types. D'abord, nous relevons des **défauts de la technologie** qui ont gêné les utilisateurs (le manque d'utilisabilité du CAVE et les dysfonctionnements), des facteurs de rejet relatifs à la **conduite de projet** en elle-même (le coût des sessions et le temps nécessaire à les préparer et à les conduire) des **besoins des utilisateurs non satisfaits** lors des sessions (avoir davantage d'informations sur les projets, représenter les outils et modifier l'environnement virtuel pendant la session).

Nous présentons dans le prochain chapitre une étude menée auprès de non-utilisateurs de la réalité virtuelle. Elles portent sur leurs perceptions à l'égard de cette technologie

CHAPITRE 3. ÉTUDE 3 : PERCEPTIONS DE NON-UTILISATEURS SUR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

1. OBJECTIFS

Nous expliquions dans notre état de l'art que le processus d'acceptabilité de la réalité virtuelle peut être considéré selon deux phases (Bobillier Chaumon & Dubois, 2009; Terrade et al., 2009). La première est la phase *d'acceptabilité*. Elle correspond au moment où les individus n'ont pas encore utilisé la réalité virtuelle. Les chercheurs s'intéressent dans ce cas à leurs perceptions de cette technologie future. Une fois la technologie utilisée, on parle d'une seconde phase, *l'acceptation*. Les études se centrent alors sur l'expérience des individus avec celle-ci et sur ce que « la technologie "permet/autorise de faire" ou "oblige à faire", mais aussi ce qu'elle "empêche de faire" ou "plus comme avant" et ce, sur différentes dimensions de l'activité » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 12).

Dans les études précédentes, nous avons proposé de nous intéresser à la fois aux perceptions des utilisateurs sur la réalité virtuelle et à leur usage de cette technologie dans des projets de conception de poste. Toutefois, comme nous l'avons précisé dans les limites de ces études, il n'a pas été possible d'interroger les utilisateurs en phase d'acceptation de la réalité virtuelle. Nous n'avons ainsi pas pu recueillir leurs perceptions sur la réalité virtuelle avant qu'ils ne l'utilisent. Pour cette raison, nous avons choisi d'intégrer à ce travail de thèse une étude en phase d'acceptabilité de la réalité virtuelle dans des cas d'usage similaires, c'est-à-dire pour des projets de conception (de postes ou d'outillages). Pour ce faire, nous avons besoin d'interroger des personnes qui pourraient potentiellement avoir recours à la réalité virtuelle dans leur travail. Nous avons choisi des métiers proches, voire similaires, à ceux des utilisateurs de nos précédentes études. Il s'agissait de personnes travaillant au service outillage et de préparateurs aéronautiques. Nous avons été orientée vers ces personnes par l'ergonome du site et le responsable du service outillage. Ils travaillent tous les deux avec une partie des personnes interrogées et ils étaient en mesure de dire qu'ils n'avaient pas recours à la réalité virtuelle dans leur travail, ce qui nous donnait l'occasion de conduire une étude sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle auprès de non-utilisateurs.

2. MÉTHODOLOGIE

Nous avons conduit des entretiens semi-directifs avec ces non-utilisateurs. Nous présenterons ici notre guide d'entretien pour le recueil de données, les

caractéristiques des personnes interrogées ainsi que notre méthode d'analyse des données.

2.1. Recueil des données

2.1.1. Entretiens semi-directifs

Les entretiens semi-directifs conduits avaient pour objectif d'étudier les perceptions des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle, mais également de questionner l'utilisation possible de la réalité virtuelle dans leur travail.

2.1.1.1. Guide d'entretien

Nous avons formalisé un guide d'entretien spécifiquement pour cette étude. Nous abordions différentes thématiques :

- la présentation de la personne interrogée, ainsi que des outils qu'elle utilise dans son travail ;
- son rôle dans les projets de conception ;
- ses expériences avec la réalité virtuelle ;
- la communication dans l'entreprise autour de la réalité virtuelle ;
- les avantages et les inconvénients envisagés de la réalité virtuelle dans son travail ;
- la manière dont la réalité virtuelle serait utilisée (phase du processus de conception, autres utilisateurs...) et les changements qu'elle engendrerait ;
- l'utilité de la réalité virtuelle ;
- ses attitudes générales sur la réalité virtuelle.

Notre guide d'entretien se trouve en annexe (Annexe 3, p. 265).

2.1.1.2. Caractéristiques des personnes interviewées

L'échantillon des personnes interrogées comprenait majoritairement des personnes du service outillage. Le Tableau 27 synthétise les caractéristiques des personnes interviewées.

Tableau 27. *Caractéristiques des personnes interviewées*

Interviewés	Métier	Genre	Ancienneté à ce poste	Expérience antérieure avec la réalité virtuelle
Non-utilisateur 1	Intégrateur maquette	Homme	6 ans	Non
Non-utilisateur 2	Correspondant outillage	Homme	1 an	Non
Non-utilisateur 3	Chargé d'affaires	Homme	1 an	Oui, fréquemment pour le loisir
Non-utilisateur 4	Responsable outillage	Homme	2 ans	Oui, avec l'entreprise (démonstration)
Non-utilisateur 5	Préparateur	Homme	7 ans	Oui, démonstration (il y a plus de 10 ans)
Non-utilisateur 6	Préparateur	Homme	3 ans	Non
Non-utilisateur 7	Correspondante vérification périodique	Femme	7 mois	Oui, expérience pour le loisir
Non-utilisateur 8	Chargée d'affaires	Femme	7 mois	Oui, expérience pour le loisir

Les personnes interrogées exercent des métiers différents, dont nous donnerons les principales missions. Pour commencer, l'intégrateur maquette est à l'interface entre les préparateurs qui font une demande d'outillage et les sous-traitants qui vont la concevoir et la fabriquer. Son travail consiste à intégrer différentes maquettes CAO d'éléments de l'avion, d'outillages ou de pièces au sein qu'une seule maquette. Pour cela, il doit rassembler toutes les données utiles au sous-traitant pour qu'il puisse concevoir le produit demandé.

Le correspondant outillage se charge des demandes d'outillage, c'est-à-dire de nouveaux outillages (par exemple, la conception d'une nouvelle grille de perçage), et des demandes d'intervention outillage, c'est-à-dire de modification d'outillages (par exemple, la modification d'un poste suite à un incident). Il est en charge de différents projets de l'expression du besoin à leur réalisation. Pour cela, il collabore avec différents services et métiers (principalement des préparateurs et des fournisseurs).

Les chargés d'affaires ont une activité proche de celle du correspondant outillage, mais pour des projets de plus grande ampleur. Pour le non-utilisateur 3, à la différence du correspondant outillage, les demandes d'outillage qu'ils traitent proviennent d'une demande d'Airbus. Les demandes que traite la non-utilisatrice 8 proviennent de Stelia et font suite à des problèmes de sécurité.

Le responsable outillage dirige l'ensemble des activités du service outillage. Lors de nouveaux projets, il a pour rôle d'identifier clairement le besoin et d'en faire

un chiffrage. Il confie ensuite la réalisation du projet à l'un des chargés d'affaires et pilote le projet dans son ensemble.

Les préparateurs sont chargés de formaliser un produit demandé par le client (Airbus, par exemple) en une gamme de montage de l'avion accompagnée de fiches techniques, de fiches d'instructions, etc. En d'autres termes, ils formalisent un process à partir d'une commande. Ils veillent également à la bonne application du process en production et à relever des améliorations possibles du poste qui peuvent être remontées par les opérateurs.

Le travail de la correspondante vérification périodique consiste à organiser des mesures laser des différents outillages afin de s'assurer de leur condition.

Nous nous sommes intéressée à l'utilisation par les personnes interrogées d'outils de maquettage, et plus particulièrement de CATIA®, qui est le logiciel utilisé dans l'entreprise. En effet, l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'entreprise requerrait de fournir aux chargés de réalité virtuelle une maquette en CAO pour qu'ils puissent construire l'environnement virtuel qui allait être utilisé lors des sessions. Le s effectuent avec ce logiciel.

Tableau 28 précise les personnes qui utilisent CATIA® et le type de tâches qu'elles effectuent avec ce logiciel.

Tableau 28. *Utilisation* par les personnes interviewées du logiciel CATIA® (logiciel de CAO)

Interviewés	Visualise des maquettes	Modélise	Informations sur les tâches réalisées
Non-utilisateur 1 (intégrateur maquette)	Oui	Non	Intègre différentes maquettes (avion, outillage) à envoyer à des fournisseurs
Non-utilisateur 2 (correspondant outillage)	Oui	Non	Consulte des maquettes créées par les fournisseurs suite à une demande d'outillage ou à une demande de modifications sur un outillage
Non-utilisateur 3 (chargé d'affaires)	Oui	Oui	Modélise des outillages en phase d'avant-projet (« pour montrer le principe ») et consulte les maquettes envoyées par les fournisseurs
Non-utilisateur 4 (responsable outillage)	Non	Non	
Non-utilisateur 5 (préparateur)	Oui	Oui	Consulte des maquettes et modélise de petits éléments (petits outillages, perçages supplémentaires...)
Non-utilisateur 6 (préparateur)	Oui	Oui	Consulte des maquettes et modélise de petits éléments (pièces à

Interviewés	Visualise des maquettes	Modélise	Informations sur les tâches réalisées
			commander, perçages supplémentaires...)
Non-utilisateur 7 (correspondante vérification périodique)	Non	Non	
Non-utilisateur 8 (chargée d'affaires)	Oui	Non	Consulte les maquettes créées par les fournisseurs

2.2. Méthodes de traitement des données

2.2.1. Analyse thématique des entretiens

Nous avons entièrement retranscrit nos entretiens et procédé à une analyse thématique de nos entretiens (Braun & Clarke, 2006). Pour coder nos transcriptions d'entretiens, nous avons utilisé le logiciel d'analyse de données qualitatives Nvivo 12 (QSR International Pty Ltd, 2019). Comme pour les études précédentes, l'analyse a été réalisée de manière itérative : nous avons d'abord identifié différents patterns dans nos entretiens, que nous avons placés dans différents codes. Nous avons ensuite regroupé ces différents codes en thématiques, que nous présentons dans la section suivante.

3. RÉSULTATS

Les données recueillies nous ont permis de caractériser les perceptions des non-utilisateurs interrogés sur la réalité virtuelle. À partir de leurs discours, nous avons construit huit thématiques. La Figure 36 synthétise nos résultats.

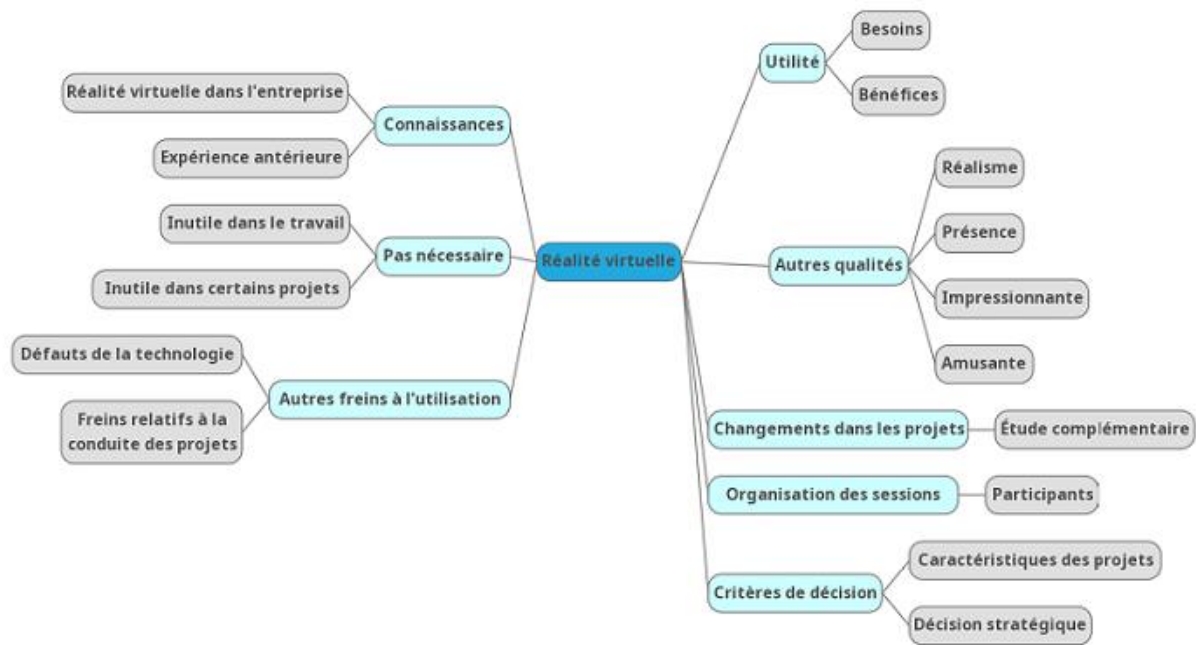


Figure 36. Synthèse des perceptions des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle

3.1. Connaissances sur la réalité virtuelle : des expériences antérieures qui varient et peu d'informations sur la réalité virtuelle dans l'entreprise

Pour commencer, l'expérience des personnes interrogées avec la réalité virtuelle variait. Comme nous l'avons présenté dans le Tableau 27, trois interviewés n'avaient jamais utilisé la réalité virtuelle (NU²³₁, 2, 6) et trois l'avaient utilisé pour le loisir (NU₃, 7, 8), dont un fréquemment (NU₃). Seules deux personnes avaient utilisé la réalité virtuelle dans un contexte professionnel (NU₅ et responsable outillage). Il s'agissait pour ces deux non-utilisateurs de démonstrations : une démonstration ancienne lors d'un salon de l'aéronautique pour le non-utilisateur 5 (« Ça remonte à loin, ouais quand on était au lycée, on était allé vite fait chez EADS à Paris. [...], mais ça remonte à dix ans ») et une démonstration récente à IndustriLAB pour le responsable outillage (« Alors je suis allé à une démonstration y'a de ça six-huit mois à IndustriLab »).

Il faut souligner qu'une partie importante des personnes interrogées avaient peu d'informations sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans l'entreprise. Quatre des huit personnes interrogées n'étaient pas informées de la présence de technologies de réalité virtuelle dans l'entreprise et des projets menés avec ces technologies. Par ailleurs, le niveau d'informations des personnes qui avaient eu des retours sur la réalité virtuelle variait. La non-utilisatrice 7 rapportait avoir eu connaissance de « bruits de couloir », sans savoir précisément ce qui était fait lors des sessions. Le non-utilisateur 6 avait quant à lui été informé des projets en réalité virtuelle dans l'entreprise par l'intermédiaire du journal interne (« On entend parler de la réalité virtuelle quand on voit des simulations de projections sur les maquettes »). Enfin, à la différence des autres non-utilisateurs cités précédemment, le responsable outillage et le non-utilisateur 3 avaient une connaissance approfondie des objectifs (« Pour anticiper un peu, voir des modifications. Ça sert aussi pour des compagnons qu'ils

²³ NU : Non-utilisateur

font travailler pour voir un peu au niveau de l'encombrement, de leur façon de travailler, leur positionnement, etc. », NU3) et des résultats des sessions en réalité virtuelle (« Ce qui nous a permis de voir beaucoup de choses, de faire des aménagements différents, on a joué beaucoup sur l'ergonomie, on avait des postes qui étaient trop hauts et on s'en est rendu compte grâce à la réalité virtuelle », NU4).

Le responsable outillage a également souligné une évolution dans les retours sur la réalité virtuelle dans l'entreprise : alors qu'elle semblait mal perçue il y a quelques années (« *C'était au tout début, au tout début pour Stelia, c'était peut-être y'a sept-huit ans. Des applications avaient été checkées par réalité virtuelle et pour lesquelles on n'avait pas le niveau de détail qu'on a aujourd'hui sur les maquettes. Et du coup on s'est aperçu que le b.a.-ba on l'a pas vu, on s'est retrouvés avec des postes qui étaient, je sais plus, vingt ou trente centimètres trop hauts* »), il lui semblait, au moment où nous l'avons rencontré, que les retours étaient unanimement positifs (« *Aujourd'hui j'en entends que du bien* »).

3.2. Utilité de la réalité virtuelle : réponses à des besoins et bénéfiques sur les outils utilisés aujourd'hui

Nous avons traité l'utilité perçue de la réalité virtuelle à travers deux thématiques : les besoins des non-utilisateurs (34 références) et les bénéfiques qu'ils envisageaient avec l'utilisation de la réalité virtuelle (66 références). Concernant leurs besoins, les non-utilisateurs ont le plus fréquemment mentionné la simulation d'opérations (NU 2, 3, 6, 8). Il s'agissait à la fois pour eux de pouvoir demander à des compagnons de simuler des opérations pour détecter des problèmes de conception (« *Le côté où le compagnon travaille vraiment comme s'il le faisait réellement, qui fait qu'on va s'apercevoir de petits détails qui, aujourd'hui passent parfois à la trappe* », NU3), mais également de réaliser eux-mêmes ces simulations pour s'assurer de la qualité du système qu'ils conçoivent (« *Certes, je le vois sur le plan ce qui va être mis en place et via CATIA, mais le fait d'avoir la réalité virtuelle, je pourrais peut-être tester pour voir si ça coulisse bien, si y'a des choses qui pourraient être améliorées en le testant réellement* », NU8).

Tester l'accessibilité des zones de travail ou « l'ergonomie » des postes est le deuxième besoin que nous relevons (NU2, 3, 5, et responsable outillage). Les personnes interrogées jugeaient la réalité utile pour détecter de potentielles collisions entre les outils et le bâti (« *Je veux dire quand tu l'as dans la main, tu te rends un peu plus compte de la possibilité que tu as pour pouvoir le mettre un peu plus dans le poste, le mettre sur l'avion, dans le bâti* », NU2), ou encore, pour pouvoir évaluer les hauteurs de travail d'un poste (« *On a joué beaucoup sur l'ergonomie, on avait des postes qui étaient trop hauts et on s'en est rendu compte grâce à la réalité virtuelle* », NU4).

Le non-utilisateur 1 a également rapporté des besoins spécifiques à son travail, qui consiste à intégrer différentes maquettes en une seule. Pour lui, la réalité virtuelle pourrait être utile pour manipuler des pièces à l'aide d'interactions naturelles, par exemple avec un dispositif de reconnaissance des mouvements des mains (« *C'est que quand je cherche des pièces, c'est vrai que y'aurait plus qu'à charger le bâti et s'amuser un peu avec les mains à éclater toutes les pièces et puis à dire c'est celle-là que je veux* »). Il a également expliqué que cette technologie pourrait faciliter la sélection de certaines pièces dans une maquette, en lui permettant de se déplacer

dans un élément avion (« *Pour voir les pièces de l'intérieur sans cacher, sans masquer des autres pièces, sans être gêné par autre chose, carrément rentrer à l'intérieur* »).

Sans être nécessairement concernés, deux des interviewés (NU1, NU2) ont également souligné que la réalité virtuelle pourrait être utile pour collaborer à distance, notamment avec d'autres sites (« *Par exemple un bureau d'étude à [site] et on doit travailler sur un poste à [site]* », NU2).

Des bénéfices de la réalité virtuelle sur les outils utilisés aujourd'hui ont par ailleurs été rapportés par les non-utilisateurs. Selon eux, elle leur permettrait de détecter des problèmes qu'ils n'arrivent pas toujours à identifier en CAO (« *Ça permet de voir des choses qu'on peut potentiellement louper nous sur les 3D* », NU3). Par conséquent, elle permettrait des gains financiers (« *Un gain financier ça c'est sûr puisque quand on fabrique une pièce, enfin quand on fabrique un outil et que ça ne va pas, on doit le modifier derrière, donc déjà le temps de reprise, et la matière qu'on utilisait la première fois et qu'on doit peut-être retirer* », NU2), puisqu'elle conduirait à opérer moins de modifications sur les outillages conçus (« *Ça peut permettre de réduire un peu plus le risque de modifications qu'on n'aurait pas vu à la base* », NU3). Ces améliorations se traduiraient également par des gains de temps (« *Le délai puisque le bâti il peut être opérationnel plus vite si on voit les choses avant* », NU4) et par une amélioration de la qualité des éléments produits (« *Ça a un gain sur différents aspects : [...] la qualité, enfin tous les paramètres sont touchés quoi* », NU4).

Nous avons également identifié des bénéfices de la réalité virtuelle dans le déroulement même des projets. D'abord, elle fonctionnerait comme un moyen pour les concepteurs de se rassurer sur les décisions qu'ils prennent (« *On serait plus sereins, en tout cas un peu plus sereins sur ça* », NU3), mais également comme un moyen de valider officiellement ces décisions (« *Je pense que c'est vraiment ça qui permettrait de, vraiment valider définitivement l'étude par exemple* », NU3).

Ensuite, alors que le responsable outillage a pointé que les projets conduits par le service outillage étaient fréquemment critiqués et rejetés (« [sur les rejets de certains projets] *Régulièrement oui, quasiment tout le temps* »), il pensait que la réalité virtuelle pouvait permettre une meilleure appropriation des projets, en intégrant les compagnons aux prises de décision (« *Ça permettrait aussi aux personnes attenantes aux projets d'avoir un meilleur sentiment d'appartenance, je pense qu'ils s'attacheraient plus au projet* »), mais également en permettant aux outilleurs d'expliquer leurs contraintes de conception (« *Alors que là on, on serait plus dans la construction, on pourrait leur expliquer les choses en avance de phase, plutôt qu'à contre coup, une fois que le bâti il est là* »). Le non-utilisateur 6 considérait également la réalité virtuelle comme un meilleur moyen pour expliquer les projets aux compagnons (« *On descend à l'atelier puis on va voir les gars puis on dit "tu vois" et un gars qui a pas l'habitude de lire en 2D il voit pas, alors que si tu lui ramènes une maquette, avant on travaillait avec des maquettes 3D, où on avait tout modélisé, là le compagnon il commence à mieux voir ses estrades, où il va monter, la hauteur de ses marches, de se rendre compte de choses comme ça, un truc habituel, là on va carrément le simuler en train de travailler* »).

3.3. Qualités de la réalité virtuelle pour les non-utilisateurs : réalisme et présence, et une technologie vue comme impressionnante et fun

En plus de son utilité, nous avons également identifié d'autres qualités de la réalité virtuelle qui étaient perçues positivement par les non-utilisateurs (25 références). Ils

ont souligné son réalisme (« *C'est vrai que c'est quand même bien fait* », NU3) et le sentiment de présence qu'ils pouvaient ressentir (« *De manière presque concrète on a l'impression d'être dedans* », NU3). Ils la jugeaient également impressionnante, surtout lors de la première utilisation (« *La première fois que je l'ai utilisé, c'était assez impressionnant* », NU8), et amusante (« *C'est fun* », NU8).

3.4. Changements envisagés avec l'utilisation de la réalité virtuelle : les sessions en réalité virtuelle comme une étude complémentaire

Nous avons relevé que les non-utilisateurs considéraient que l'utilisation de la réalité virtuelle serait une nouvelle étape de la conduite de projet (11 références). Les sessions en réalité virtuelle constitueraient une étude complémentaire aux études réalisées par les fournisseurs, les méthodes ou le bureau d'études, ainsi qu'aux réunions réalisées aux différentes étapes du projet (« *Je pense que le processus de validation de l'étude il serait un peu différent, à l'heure d'aujourd'hui, je regarde sur mon ordinateur puis je balance direct par mail. Là, du coup, je recevrais l'étude, je regarderais si y'a une place de dispo, et ensuite, je modifierais en conséquence avec la personne adéquate* », NU2).

3.5. Organisation des sessions : différents métiers à convier

Ils se sont également exprimés sur l'organisation des sessions qu'ils organiseraient (23 références), et plus particulièrement sur les métiers qu'ils convieraient. Les compagnons étaient les premiers cités (« *Un compagnon expérimenté qui connaît bien le poste, qui connaît bien les opérations à effectuer et puis je pense que c'est eux qui vont travailler dessus et qui vont pouvoir dire si oui ou non, s'ils sont biens, s'ils vont pouvoir faire ce qu'ils ont à faire* », NU3). Toutefois, ils considèrent qu'il pourrait être difficile de libérer des compagnons de la production pour les faire participer aux sessions. Nous reviendrons sur ce point dans les freins à l'utilisation de la réalité virtuelle. Pour cette raison, ils pensent que des chefs d'équipe, qui auraient une bonne connaissance de la production, pourraient remplacer les compagnons, leur servir d'intermédiaires (« *Ou alors un chef d'équipe qui connaît le poste* », NU3). Par ailleurs, il est également important pour eux, en plus des compagnons, d'intégrer les préparateurs aéronautiques (« *Je modifierais en conséquence avec la personne adéquate, le préparateur* », NU2).

Pour le non-utilisateur 3, il aurait fallu intégrer « tous les interlocuteurs » pour valider les projets. Il incluait en plus des acteurs cités précédemment un ergonome, pour valider les simulations conduites en réalité virtuelle (« *Ça peut être aussi intéressant d'avoir quelqu'un comme un ergonome ou quelque chose comme ça pour dire ah oui en termes de positionnement on est bien, ah bah non là le compagnon il est dans une position qui est pas très confortable, faut essayer de voir, pour modifier ci, modifier ça* »).

Les non-utilisateurs 2 et 8 incluait également les fournisseurs. La non-utilisatrice 8 validerait l'outillage lors d'une session avec le fournisseur (« *Avec le fournisseur, moi ça me permettrait de, déjà dans un premier temps, qu'on finalise ensemble la solution* »), alors que pour le non-utilisateur 2, le fournisseur pourrait se charger de valider une première fois le poste en réalité virtuelle (« *Donc à la limite, les gens qui proposent l'étude, eux-mêmes, feraient la validation en VR, au préalable, ce serait intéressant, même si, on doit valider nous-même derrière* »).

Enfin, le non-utilisateur 2 suggérerait d'utiliser la réalité virtuelle avec un collègue, qui travaille sur un poste similaire et avec lequel il collabore, afin d'avoir un deuxième avis sur l'évaluation de l'outillage (« *Je le ferais ici pour avoir un deuxième avis quoi, histoire de pas être seul ou d'être deux têtes pensantes* »).

3.6. Critères de décision pour le recours à la réalité virtuelle : projets nouveaux, complexes, et de grande ampleur, mais aussi une décision stratégique

Par ailleurs, nous avons pu relever différents critères qui motiveraient les non-utilisateurs à utiliser la réalité virtuelle (26 références). Les premiers critères concernent certaines caractéristiques des projets de conception. Selon eux, la réalité virtuelle est utile pour des projets nouveaux (« *Tout ce qui est industrialisation de nouveaux moyens* », responsable outillage), complexes (« *[un poste] complexe sur lequel on va avoir beaucoup d'opérations* », NU3) et de grande ampleur (« *C'est bien, mais c'est quand on industrialise carrément un nouvel avion* », NU6). Nous verrons dans la prochaine section que, en contrepartie, elle est perçue comme inutile pour des projets qui ne présentent pas ces caractéristiques.

Le deuxième critère de décision n'est pas individuel, mais plutôt stratégique. L'intégration de la réalité virtuelle aux projets du service outillage est un souhait de la direction, porté par le responsable du service (« *C'est une décision qui a été portée par la direction* »). Des réflexions sont également menées quant au recours à la réalité virtuelle de manière obligatoire (« *Pour qu'ensuite ça soit une démarche, ça rentre dans nos programmes de façon obligatoire* »), et non pas selon la volonté de l'équipe de conception, comme cela pouvait être le cas au moment où nous avons conduit cette étude. Les deux études menées précédemment sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans les projets de conception (Partie III. Chapitre 1 et 0) illustrent d'ailleurs l'utilisation de la réalité virtuelle comme une décision volontaire de l'équipe de conception.

3.7. Inutilité de la réalité virtuelle : pas toujours pertinente dans le travail des non-utilisateurs

Comme nous l'expliquions précédemment, en contrepartie de son utilité, l'inutilité de la réalité virtuelle a été très fortement pointée par les non-utilisateurs (24 références) : pour plus de la moitié des interviewés, elle ne serait pas utile dans leur travail (« *Mais pour moi non, je vois pas [d'utilité], je pense que ça n'améliorerait pas grand-chose* », NU1). Différentes raisons étaient avancées, notamment les contenus des projets sur lesquels les personnes travaillent. Ils considèrent notamment qu'elle n'est pas utile pour de petits projets (« *Après on fait aussi beaucoup de petits outillages donc là c'est petit, ça n'a pas de sens* », responsable outillage) ou pour des projets de duplication d'outillages. Le non-utilisateur 3 a justifié l'inutilité de la réalité virtuelle dans ce cadre en expliquant que ces duplications sont rapides à faire (« *La duplication d'outillages qu'on connaît à utiliser sur les postes, ça pour moi ça n'en a pas l'utilité du tout puisque ça sera plus une perte de temps qu'autre chose, aujourd'hui ce sont des choses qui sont rapides à faire* », NU3).

La non-utilisatrice 8 a également mentionné des projets qui concernent des éléments avions et qui impliquent les compagnons seulement indirectement, comme les projets de conception ou de modification de ferrures de hissage (« *Dans tout ce*

qui est ferrure en fait, au final bah c'est un outillage qui sert surtout pour tout ce qui est fixation des éléments avion »).

Enfin, la non-utilisatrice 7 a souligné que la réalité virtuelle est inutile pour les activités qui ne demandent pas de visualisation d'outillages (« *J'ai rien de manuel ou j'ai aucune, j'ai pas besoin de visualisation* ») ou pour les activités qui ne requièrent pas de manipulation (« *Je pense qu'à partir du moment où on a quelque chose d'un petit peu, d'un petit peu manuel, il peut y avoir des valeurs ajoutées* »).

3.8. Freins à l'utilisation de la réalité virtuelle : défauts de la technologie et freins relatifs à la conduite des projets

En plus de son manque d'utilité dans certaines situations, nous avons identifié d'autres freins à l'utilisation de la réalité virtuelle. Les premiers sont relatifs à des problèmes dans l'utilisation (18 références) et les seconds concernent la conduite des projets (31 références).

La première limite de la réalité virtuelle mentionnée par les utilisateurs concerne les écarts entre le monde virtuel et le monde physique (« *Même si les jeux vidéo ont énormément évolué et qu'on n'est vraiment pas loin de la vérité, ça reste quand même du numérique, on n'est pas sur du concret* », NU2). La non-utilisatrice 8 craignait par ailleurs que la réalité virtuelle puisse donner des attentes irréalisables (« *Ça pourrait aussi amener à vouloir peut-être trop idéaliser quelque chose qui n'est pas forcément possible aussi* »).

Les conséquences négatives de l'utilisation de la réalité virtuelle sont également à considérer comme des freins. Les non-utilisateurs ont souligné par exemple que les maux de tête (« *Les points faibles c'est que ça donne mal à la tête je trouve à force* », NU8) ou la fatigue visuelle (« *S'il fallait porter un casque toute la journée sur sa tête, à la fin de journée je pense que ça serait quand même très fatigant* », NU2) les empêcheraient d'utiliser la réalité virtuelle fréquemment ou pour de longues durées. La non-utilisatrice 8 a également pointé le sentiment d'être coupée du monde physique comme un facteur de gêne (« *Les points faibles c'est que [...] à force de l'utiliser, on perd vite la notion du temps.* »).

Des facteurs relatifs à la conduite de projet amèneraient par ailleurs les personnes interrogées à ne pas utiliser la réalité virtuelle. Ces facteurs renvoient à l'idée que la décision d'utiliser la réalité virtuelle ou non est prise selon une analyse coûts-bénéfices. Le premier facteur est relatif au temps consacré à la réalité virtuelle, qui peut être considérée comme une perte de temps (« *Enfin moi j'ai soixante-dix projets à suivre, je reçois des projets de validation d'études, je dirais entre deux à trois par semaine, si je dois passer déjà trois quarts d'heure à passer à chaque fois en VR, ça fait déjà un gros temps de passé en VR* », NU2). Les contraintes temporelles auxquelles ils sont soumis lors de la conduite de leurs projets ont également été mentionnées (« *En ce moment, c'est de plus en plus ça, on est toujours dans l'urgence, dans l'urgence, il faut se dépêcher de travailler, de faire le poste* », NU3). Dans le même ordre d'idée, la disponibilité des participants aux sessions (compagnons, préparateurs) a également été questionnée, puisque les interviewés craignaient qu'ils ne puissent pas se libérer. De plus, le non-utilisateur 2 s'inquiétait du partage de la technologie entre plusieurs outilleurs : pour des raisons de disponibilité immédiate de la technologie (« *Si t'es seul avec la salle de casque et que t'as toujours accès, ça marche par contre, si on est plusieurs à l'utiliser et qu'il faut attendre, y'a un moment où tu vas perdre du temps la possibilité à valider ou pas ta*

pièce »), mais également à cause de la longueur des sessions (« [les chargés d'affaires] ne peuvent pas valider ça en dix minutes, il leur faut au minimum une heure, surtout s'ils sont plusieurs »).

Par ailleurs, le non-utilisateur 1 a explicitement souligné que les coûts de la réalité virtuelle seraient trop importants par rapport à la proportion de son activité pour laquelle la réalité virtuelle serait utile (« Pour moi, je pense que ça n'améliorerait pas grand-chose, je pense que ça serait un coût trop important par rapport à ce que ça va m'apporter, enfin par rapport au client »).

Les personnes interviewées pensent également que certaines personnes pourraient être réfractaires à la réalité virtuelle et refuser de participer aux sessions organisées (« Ça peut être aussi une avancée, mais il faut aussi réussir à faire adopter cette avancée aux gens. Des fois, je pense que c'est pas facile à faire », NU8).

Enfin, le non-utilisateur 2 a mentionné des écarts entre la maquette CAO et le monde physique, certains aspects gênants sur les postes n'étant identifiables qu'en étant réellement confrontés aux postes (« Parfois c'est une rallonge pneumatique qui passe là, elle a rien à faire sur la CAO, et pourtant elle est là et elle nous gêne »).

4. DISCUSSION

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'acceptabilité de la réalité virtuelle pour des personnes ne l'utilisant pas, que nous désignons par les termes de *non-utilisateurs*. Notre objectif était de déterminer la manière dont des non-utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle et s'ils avaient l'intention (ou non) de l'utiliser. Puisque les précédentes études de ce travail de recherche portaient sur des projets de conception d'outillage, nous avons choisi de nous centrer sur des non-utilisateurs qui pourraient avoir recours à la réalité virtuelle dans le même objectif. Pour cette raison, les non-utilisateurs de cette étude occupaient des postes proches ou similaires des utilisateurs de nos études précédentes : ils étaient chargés d'affaires au service outillage ou préparateurs aéronautiques. Nous avons également inclus des personnes qui exerçaient leur activité au service outillage.

Nous avons obtenu trois résultats principaux. D'abord, nous mettons en évidence que les non-utilisateurs interrogés s'inscrivent dans deux formes de non-usage différentes : le manque d'intérêt et l'adoption tardive. Ensuite, nous avons identifié des freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception. Pour finir, nous avons observé que les non-utilisateurs rapportent des perceptions positives sur la réalité virtuelle qui ne semblent pas prédire leur intention de l'utiliser. Après un point sur les connaissances des non-utilisateurs interrogés sur la réalité virtuelle, nous expliquerons et discuterons ces résultats.

4.1. Peu de connaissances sur la réalité virtuelle

En premier lieu, il convient de souligner que les personnes interrogées avaient peu de connaissances sur la réalité virtuelle et sur son utilisation dans l'entreprise. Seules deux personnes avaient une expérience de cette technologie dans un contexte professionnel – et sans qu'ils ne l'aient utilisé dans le cadre d'une revue de projet réelle, puisqu'il s'agissait de démonstrations.

La moitié des personnes interrogées n'avait pas connaissance que l'entreprise était équipée de réalité virtuelle et de la manière dont elle était utilisée dans les projets. Seul le responsable outillage et le non-utilisateur 3 savaient comment elle était

utilisée, ce qui s'explique par les postes qu'ils occupent. Le responsable outillage était évidemment informé des projets du service outillage qui intègrent de la réalité virtuelle : il avait donc connaissance de la manière dont elle a été utilisée dans le projet présenté dans notre étude 2 et des décisions de conception qui ont suivi. Le non-utilisateur 3 est chargé d'affaires outillage. Comme le chargé d'affaires de l'étude précédente, il pilote des projets de conception d'outillages : il avait eu connaissance de l'utilisation de la réalité virtuelle pour le projet de l'étude 2 et des modifications apportées au projet.

Ce manque de connaissances sur la réalité virtuelle est un frein à son utilisation. Aujourd'hui, ce sont les concepteurs qui décident ou non d'intégrer la réalité virtuelle à leur projet, à condition que les coûts de l'utilisation de la réalité virtuelle n'engendrent pas un dépassement du budget alloué au projet. Dans le futur, le responsable du service outillage envisage d'acquérir un visio-casque qui serait à disposition des outilleurs. Nous pensons que le manque de connaissances des outilleurs sur la réalité virtuelle, sur ses possibilités et sur ses apports dans les projets antérieurs pourrait être un frein à son utilisation volontaire.

En effet, nous doutons que des personnes qui ne connaissent pas une technologie l'utilisent volontairement. Dans le TAM2, Venkatesh et Davis (2000) montrent que l'utilité perçue d'une technologie est prédite par la manière dont les individus pensent qu'elle est pertinente avec leur travail ainsi que par la manière dont ses résultats sont visibles et de qualité. Il semble nécessaire que les individus possèdent différentes connaissances sur les résultats obtenus avec une technologie pour la juger utile. De la même manière, dans la théorie de la diffusion des innovations de Rogers (1962, 1995), la visibilité des résultats fait partie des facteurs favorisant la diffusion d'une technologie. Des études empiriques soulignent également que le manque de connaissances des individus peut expliquer le non-usage d'une technologie, par exemple pour les technologies d'assistance pour des personnes malvoyantes (Brady, Thies, & Cutrell, 2014) ou pour l'usage des téléphones portables, des ordinateurs et d'internet chez les personnes âgées (Neves, Amaro, & Fonseca, 2013).

4.2. Deux formes de non-usage : manque d'intérêt et adoption tardive

Nos résultats nous permettent de distinguer deux formes de non-usage chez les non-utilisateurs interrogés : la moitié jugeait la réalité virtuelle inutile dans leur travail, et l'autre moitié la jugeait utile sans toutefois l'utiliser.

Pour les premiers, différentes raisons sont avancées au manque d'utilité de la réalité virtuelle pour leur travail. Pour le non-utilisateur 1, elle pourrait uniquement servir à sélectionner des pièces plus facilement dans une maquette (ce qui représente selon lui 20 % de son activité) : il considère que le coût était trop important pour les bénéfices qu'il pourrait en tirer. Pour les préparateurs interrogés, elle n'est pas utile, car ils travaillent sur des projets de petite taille ou très restreints (par exemple, il peut s'agir d'ajouter des perçages à un panneau). L'activité de la non-utilisatrice 7 consiste majoritairement à planifier des vérifications d'outillages ; elle n'a pas besoin de visualiser des pièces et elle considère donc également que la réalité virtuelle serait inutile dans son travail. Ces résultats renvoient à un manque de pertinence de la réalité virtuelle pour le travail de ces non-utilisateurs. Le TAM2 montre que ce jugement a un effet négatif sur l'utilité perçue (Venkatesh & Davis, 2000). Ainsi, on peut expliquer

que les non-utilisateurs de cette catégorie jugent la réalité virtuelle inutile, car elle n'est pas en adéquation avec les tâches qu'ils doivent exécuter.

Le manque d'intérêt pour une technologie a par ailleurs été identifié comme un facteur explicatif de son non-usage (Satchell & Dourish, 2009), mais aussi de son rejet (Murthy & Mani, 2013). La littérature sur l'acceptabilité des technologies identifie par ailleurs l'utilité comme un fort prédicteur des intentions d'usage (e.g., Davis, 1989). De la même façon, la théorie de la diffusion des innovations pointe la perception de la comptabilité entre l'utilisateur, ses habitudes, et ici ses tâches, comme un facteur favorisant l'adoption des technologies. Nous pouvons alors nous questionner sur le type de non-usage dans lequel s'inscrit cette première catégorie de non-utilisateurs : s'agit-il de non-adoption ou de rejet ? Pour Laumer et Eckhardt (2012), on parle de *non-adoption* lorsqu'un individu n'utilise pas un système, mais qu'il s'autorise une future adoption, alors qu'on parle de *rejet* lorsqu'un individu prend la décision délibérée de ne pas utiliser une technologie. La mise à disposition d'un visio-casque dans le service pourrait permettre de trancher puisque le manque perçu d'utilité de la réalité virtuelle pourrait conduire ces non-utilisateurs à la rejeter formellement. Sans oublier que l'introduction de la réalité virtuelle dans le service pourrait faire évoluer les perceptions des utilisateurs sur son utilité.

La seconde moitié des non-utilisateurs interrogés jugent la réalité utile dans leur travail. Il s'agit des deux chargés d'affaires outillage, du correspondant outillage et du responsable du service. Les chargés d'affaires reçoivent (et parfois conçoivent) des maquettes d'outillage. Ils ont besoin de les visualiser. Pour cette raison, ils considèrent que la réalité virtuelle serait utile dans leur travail. En complément, elle leur permettrait de simuler des opérations pour évaluer les postures que pourraient prendre les compagnons, ainsi que d'évaluer l'accessibilité des zones de travail. Ils pensent également l'utilisation de la réalité virtuelle comme un moyen de valider les décisions de conception prises par l'équipe. Ils ont tout de même précisé qu'elle ne serait pas utile pour tous les projets de conception, mais pour ceux qui concernent des outillages de grande ampleur, nouveaux, ou complexes. À l'inverse des non-utilisateurs de la première catégorie, ils jugeaient la réalité virtuelle pertinente avec leur travail et donc utile (Venkatesh & Davis, 2000).

Nous pensons que les perceptions de cette catégorie de non-utilisateurs sur l'utilité de la réalité virtuelle illustrent une situation de non-adoption, plus que de rejet : ce sont des individus qui n'utilisent pas la réalité virtuelle aujourd'hui, mais qui ne rejettent pas l'idée d'une utilisation future. Dans la théorie de la diffusion des innovations, Rogers (1962, 1995) identifie cinq profils d'utilisateurs. Les individus qui adoptent les innovations les premiers sont les innovants et les adoptants précoces. Ils comprennent les enthousiastes des technologies et les visionnaires qui sont intéressés par les innovations. Ils sont suivis de la majorité précoce et de la majorité tardive, qui eux ont besoin de preuves tangibles de l'intérêt d'une technologie. Enfin, les retardataires sont les derniers à adopter une innovation. Sur la base de cette théorie, Satchell et Dourish (2009) proposent de parler d'adoption tardive (*lagging adoption*) pour désigner les situations où les non-utilisateurs sont en réalité de futurs utilisateurs qui n'ont pas encore pris la décision d'utiliser. Notre seconde catégorie de non-utilisateurs semble répondre à ce critère, puisqu'elle juge la réalité virtuelle utile et qu'elle pointe différents besoins auxquels elle pourrait répondre. Toutefois, là aussi, seule l'introduction de la réalité virtuelle pourrait nous permettre d'affirmer que ces non-utilisateurs étaient en réalité de *futurs* utilisateurs.

Les résultats obtenus sur ces deux formes de non-usage de la réalité virtuelle peuvent également être reliés à la question de son acceptabilité. Dans ce travail de recherche, nous avons défini l'acceptation selon deux critères : d'une part, des perceptions positives sur ses qualités et l'intention d'utiliser une technologie, et, d'autre part, un usage effectif. Dans cette étude, les personnes interrogées n'utilisaient pas la réalité virtuelle ; nous nous intéressons uniquement à leurs perceptions et à leurs intentions de l'utiliser. Pour la première catégorie de non-utilisateurs, nous pouvons souligner une absence d'intentions d'utiliser la technologie et une perception négative de son utilité (bien qu'ils jugent certaines caractéristiques de la réalité virtuelle positivement, nous y reviendrons dans la section suivante). Sur ce critère, celui du manque d'utilité et d'intention d'utiliser, nous pouvons pointer un manque d'acceptabilité de la réalité virtuelle pour ces non-utilisateurs. À l'inverse, la seconde catégorie de non-utilisateurs perçoit positivement l'utilité de la réalité virtuelle et elle a l'intention de l'utiliser : nous pouvons parler ici d'une technologie acceptable. Rappelons toutefois que les intentions d'usage d'une technologie ne prédisent pas en totalité son usage effectif. Il est possible que les non-utilisateurs qui jugent aujourd'hui la réalité virtuelle et qui aimeraient l'utiliser ne l'utilisent pas dans le futur. Dans la prochaine section, nous présenterons les freins qu'ils ont identifiés et qui gêneraient l'utilisation de la réalité virtuelle dans les projets de conception.

4.3. Freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets

Les non-utilisateurs ont également expliqué certaines raisons qui freineraient l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception. La première est la perte de temps qu'elle pourrait engendrer : les utilisateurs qui la jugeaient utile dans leur travail ont également souligné qu'ils sont sujets à des contraintes temporelles importantes, qui leur demandent de répondre rapidement à certains projets, ou qu'ils ont une charge de travail importante qui ne leur permettrait pas d'utiliser la réalité virtuelle pour l'ensemble de leurs projets. Nous pouvons penser qu'ils pourraient ne pas utiliser la réalité virtuelle dans ces conditions et la réserver aux projets nouveaux, de grande ampleur et complexes.

La disponibilité des personnes conviées aux sessions en réalité virtuelle était par ailleurs un point d'inquiétude pour les non-utilisateurs. Ils ont expliqué la difficulté de collaborer avec différents services (« *Il faudrait du temps aujourd'hui, on sait qu'avoir tous les interlocuteurs, avoir la qualité, la production, la préparation, le HSE pour valider les sujets, c'est compliqué de les avoir* », NU3). De même, ils pensent qu'il serait difficile de libérer des compagnons de la production pour participer aux sessions (« *Je me verrais difficilement aller tester ça avec un compagnon. Déjà faudrait que le compagnon soit disponible* »). Ils ont alors proposé des alternatives comme convier un chef d'équipe qui connaît suffisamment le travail des compagnons.

La disponibilité de la technologie pourrait également freiner son utilisation. L'objectif aujourd'hui est qu'elle soit implantée dans le service outillage et disponible pour tous, ce qui sous-entend un partage de la technologie et des situations où le fait qu'un outilleur utilise la technologie empêche un autre de s'en servir. Toutefois, seul le non-utilisateur 2 a pointé le partage du visio-casque comme un frein.

4.4. Perceptions positives des qualités de la réalité virtuelle

Nous relevons par ailleurs dans cette étude que, bien qu'ils ne la jugeaient pas nécessairement utile, l'ensemble des non-utilisateurs a rapporté des perceptions

positives sur la réalité virtuelle. D'abord, ils ont exprimé des attitudes positives sur la technologie en général (« *Je trouve que c'est plutôt bien* », NU3). Ils ont également souligné son côté ludique, le sentiment de présence ressenti et son réalisme. Ils ont par ailleurs rapporté que les premières utilisations sont « impressionnantes ».

Pourtant, ces perceptions positives sur les qualités de la réalité virtuelle ne semblent pas prédire les intentions d'usage des non-utilisateurs. Ce sont plutôt son utilité et son adéquation avec leurs tâches qui semblent déterminer l'intention de l'utiliser ou non. Ces résultats sont à mettre en lien avec les résultats habituellement obtenus dans les études sur l'acceptabilité sociale de la technologie. Dans ces études, tout comme dans la nôtre, l'utilité perçue d'une technologie joue un rôle décisif dans la formation des intentions d'usage (e.g., Davis, 1989). Toutefois, elle prédit les intentions d'usage habituellement en combinaison avec d'autres variables telles que la facilité d'utilisation perçue (e.g., Manis & Choi, 2019) ou encore le plaisir perçu (e.g., Tokel & Ísler, 2013). Il faut préciser que les études conduites sur l'acceptabilité des technologies concernent fréquemment des individus qui ont déjà utilisé une technologie ou qui la connaissent suffisamment. Ils s'appuient donc sur leur expérience avec la technologie. Ici, comme nous l'avons souligné précédemment, les personnes interrogées n'ont pas d'expérience de la réalité virtuelle dans des projets de conception et ils ont peu d'informations sur la manière dont elle est utilisée dans les projets déjà conduits. Nous pouvons penser qu'elles s'appuient uniquement sur son utilité pour déterminer si elles l'utiliseraient ou non. La prédiction des intentions d'usage pour des utilisateurs ayant peu de connaissances sur une technologie demande d'être davantage investiguée. Nous reviendrons sur ce point dans les limites de cette étude.

4.5. Limites de l'étude

Pour finir, certaines limites de cette étude sont à relever. Elles ouvrent des perspectives de recherche sur les perceptions des non-utilisateurs sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans des projets de conception.

La première limite de cette étude concerne la composition de la population interrogée. Cette étude comprenait des outilleurs (chargé d'affaires ou autres) et des préparateurs aéronautiques. Dans les études conduites précédemment sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans des revues de projet, les utilisateurs comprenaient des chargés d'affaires, des préparateurs aéronautiques et des compagnons. Les préparateurs étant d'ailleurs, au côté des compagnons, les métiers les plus représentés. Dans cette étude, nous n'avons pu interroger que deux préparateurs qui, comme nous l'avons noté, travaillent sur des projets restreints, pour lesquels ils ne jugent pas la réalité virtuelle utile. Il aurait été intéressant d'interroger d'autres préparateurs qui traitent de projets de plus grande ampleur, comme des modifications de poste ou la conception de postes nouveaux. Nous prévoyions d'autres entretiens avec une demi-douzaine de préparateurs et avons l'accord de leur responsable, mais le projet n'a jamais abouti.

Il faut également noter que, dans cette étude, nous proposons une analyse ponctuelle du non-usage, qui est amené à évoluer : comme nous l'expliquons plus tôt, il est prévu que la réalité virtuelle soit implantée dans le service pour permettre aux outilleurs de l'utiliser dès qu'ils le souhaitent. C'est à ce moment que nous observerons que les non-utilisateurs interrogés rejettent la technologie, ne l'utilisent pas sans la rejeter délibérément (ce que Laumer et Eckhardt [2012] qualifient de

résistance passive) ou l'acceptent. Il n'est pas possible aujourd'hui de déterminer si le deuxième groupe de non-utilisateurs, qui juge la réalité virtuelle utile sans l'utiliser, est en phase d'acceptabilité de la réalité virtuelle, où s'ils vont demeurer des non-utilisateurs de cette technologie.

Il aurait également fallu pouvoir interroger des personnes qui rejettent cette technologie ; par exemple, dans l'étude 2, un autre chargé d'affaires outillage a décidé de ne pas intégrer la réalité virtuelle dans la conduite du projet. De la même manière, il est possible que des personnes aient utilisé la réalité virtuelle dans le passé et aient choisi de ne pas l'utiliser à nouveau. Il aurait été intéressant d'identifier chez ces personnes les raisons qui les poussent à ne pas utiliser la réalité virtuelle.

Pour finir, notre étude soulève des questionnements et ouvre des perspectives de recherche. Notre premier questionnaire concerne le passage du non-usage à l'usage. Nous avons pointé qu'une partie des non-utilisateurs de cette étude jugeait la réalité virtuelle utile, mais également qu'elle pointait des freins à son utilisation (contraintes temporelles, disponibilité des acteurs). Seules des études conduites en situation réelle, lorsque les utilisateurs choisiront d'utiliser la technologie, pourraient nous permettre de déterminer quels sont les facteurs qui déterminent la décision d'utiliser. Notre second questionnaire concerne l'impact des connaissances sur une technologie sur les intentions de l'utiliser. Nous avons noté que la majeure partie des utilisateurs interrogés avaient peu de connaissances sur la réalité virtuelle. Pourtant, l'utilité perçue est déterminée par des connaissances au sujet d'une technologie, notamment sur les résultats qu'elle permet (Venkatesh & Davis, 2000). Nous nous questionnons alors sur l'impact de ces connaissances et de l'évolution de ces connaissances à la fois sur l'utilité perçue et sur les intentions d'usage.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 3

L'objectif de cette étude était de déterminer la manière dont des **non-utilisateurs perçoivent la réalité virtuelle** et s'ils ont **l'intention** (ou non) de l'utiliser.

Nous avons conduit des entretiens avec **huit non-utilisateurs**, qui étaient des **outilleurs** et des **préparateurs aéronautiques**. Il faut souligner que ces personnes avaient **peu de connaissances** de la réalité virtuelle et n'étaient pas toujours informées de la présence de ce type de technologies dans l'entreprise.

Dans cette étude, nous avons identifié **deux types de non-usage** chez les personnes interrogées : un **manque d'intérêt** et une **adoption tardive** (Satchell & Dourish, 2009). Pour les non-utilisateurs s'inscrivant dans la première forme de non-usage, la réalité virtuelle n'est **pas utile**, car elle n'est **pas en adéquation avec leurs activités**. Nous pouvons penser qu'ils la rejetteraient s'ils y avaient accès. Pour la deuxième catégorie de non-utilisateurs, la réalité virtuelle est pertinente pour leur travail ; ils la jugent **utile** pour simuler des postures et prendre des décisions de conception. Ils ont souligné son intérêt surtout pour des projets de grande ampleur, nouveaux ou complexes. **L'introduction de la réalité virtuelle** dans le service outillage pourra nous permettre de déterminer si ces non-utilisateurs étaient en réalité de **futurs utilisateurs**.

Des freins à l'acceptation de la réalité virtuelle ont été identifiés dans cette étude. Le manque de connaissances des non-utilisateurs en est un, ainsi que leur jugement sur son **inutilité**, notamment pour les non-utilisateurs de la première forme de non-usage. De plus, les non-utilisateurs ont expliqué que les **contraintes temporelles** auxquelles ils sont soumis, mais également celles auxquelles sont soumises les personnes avec qui ils collaborent, pourraient les empêcher d'avoir recours à la réalité virtuelle. Certains utilisateurs craignaient également la **disponibilité** de la technologie si elle était partagée.

Enfin, nous avons mis en évidence des **perceptions positives** des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle, qui ne semblent pourtant **pas expliquer** leurs intentions d'usage. Les non-utilisateurs, même s'ils jugeaient cette technologie inutile, ont mis en avant le sentiment de **présence** ressenti lors de l'utilisation de la réalité virtuelle, ou encore son **réalisme** et son côté **ludique**.

Le prochain chapitre est consacré aux perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle. Il nous permettra de mettre en lien les résultats obtenus dans nos trois premières études.

CHAPITRE 4.

ÉTUDE 4 : PERCEPTIONS DES CHARGÉS DE RÉALITÉ VIRTUELLE SUR LA RÉALITÉ VIRTUELLE

1. OBJECTIFS

L'objectif de cette étude était d'identifier les perceptions au sujet de la réalité virtuelle de deux utilisateurs particuliers que sont les chargés de réalité virtuelle. Pour ces personnes, la réalité virtuelle est un outil de travail avec lequel ils ont une expérience étendue et qu'ils cherchent à promouvoir dans l'entreprise. Ils ont également assisté et accompagné l'ensemble des sessions en réalité virtuelle que nous avons observées. Le second objectif de cette étude était de mieux comprendre les différences entre le CAVE (utilisé dans trois sessions) et le visio-casque (utilisé dans une session), ainsi que les évolutions futures de ces technologies au sein du service R&T de l'entreprise. Il faut considérer cette courte étude comme une mise en lien des études sur l'acceptation conduites précédemment.

2. MÉTHODOLOGIE

Nous avons conduit des entretiens semi-directifs avec les deux chargés de réalité virtuelle. Nous présenterons notre guide d'entretien, les caractéristiques des personnes interrogées ainsi que notre méthode d'analyse des données.

2.1. Recueil des données

2.1.1. Entretiens semi-directifs

Les entretiens semi-directifs conduits avaient pour objectif d'étudier les perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle, de comprendre les différences entre les technologies utilisées (visio-casque et CAVE), ainsi que les évolutions envisagées de la réalité virtuelle dans l'entreprise.

2.1.1.1. Guide d'entretien

Nous avons formalisé un guide d'entretien spécifiquement pour cette étude. Nous avons abordé avec les chargés de réalité virtuelle différentes thématiques :

- la présentation générale de la personne interrogée ;
- le fonctionnement de la réalité virtuelle dans l'entreprise (demande de sessions, rôle des chargés de réalité virtuelle) ;
- l'intégration du chargé de réalité virtuelle dans les projets de conception ;
- l'expérience du chargé de réalité virtuelle avec les outils 3D et la réalité virtuelle ;
- ses expériences antérieures avec la réalité virtuelle dans des projets de conception ;
- la communication autour de la réalité virtuelle dans l'entreprise ;
- l'utilité de la réalité virtuelle ;
- sa facilité d'utilisation ;
- les freins identifiés par le chargé de réalité virtuelle à l'utilisation de la réalité virtuelle.

Ce guide d'entretien est présenté en détail en annexe (Annexe 4, p. 267)..

2.1.1.2. *Caractéristiques des personnes interviewées*

Les deux chargés de réalité virtuelle ont été interrogés individuellement. Le premier se charge des sessions ayant lieu dans le CAVE. Il a participé aux deux sessions de l'étude 1 et à la première session de l'étude 2. Le second chargé de réalité virtuelle se charge des sessions ayant lieu avec le visio-casque. Il a participé à la seconde session de l'étude 2. Nous donnons dans le Tableau 29 l'ancienneté de ces deux personnes, les dispositifs qu'elles utilisent, et les sessions auxquelles elles ont participé.

Tableau 29. *Caractéristiques des personnes interviewées*

Interviewés	Ancienneté	Dispositifs utilisés	Sessions
Chargé de réalité virtuelle 1	15 ans, 4 ans sur la réalité virtuelle	CAVE	Deux sessions de l'étude 1 et 1 ^{re} session de l'étude 2
Chargé de réalité virtuelle 2	31 ans dans l'entreprise, 3 ans sur la réalité virtuelle	Visio-casque	2 ^e session de l'étude 2

2.2. Méthodes de traitement des données

2.2.1. *Analyse thématique des entretiens*

Nous avons entièrement retranscrit nos entretiens et procédé à une analyse thématique de nos entretiens (Braun & Clarke, 2006). Pour coder nos transcriptions d'entretiens, nous avons utilisé le logiciel d'analyse de données qualitatives Nvivo 12 (QSR International Pty Ltd, 2019). Comme pour les études précédentes, l'analyse a été réalisée de manière itérative : nous avons d'abord identifié différents patterns dans nos entretiens, que nous avons placés dans différents codes. Nous avons ensuite

regroupé ces différents codes en thématiques, que nous présentons dans la section suivante.

3. RÉSULTATS

Les données recueillies nous ont permis de caractériser les perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle. La Figure 37 synthétise nos résultats.

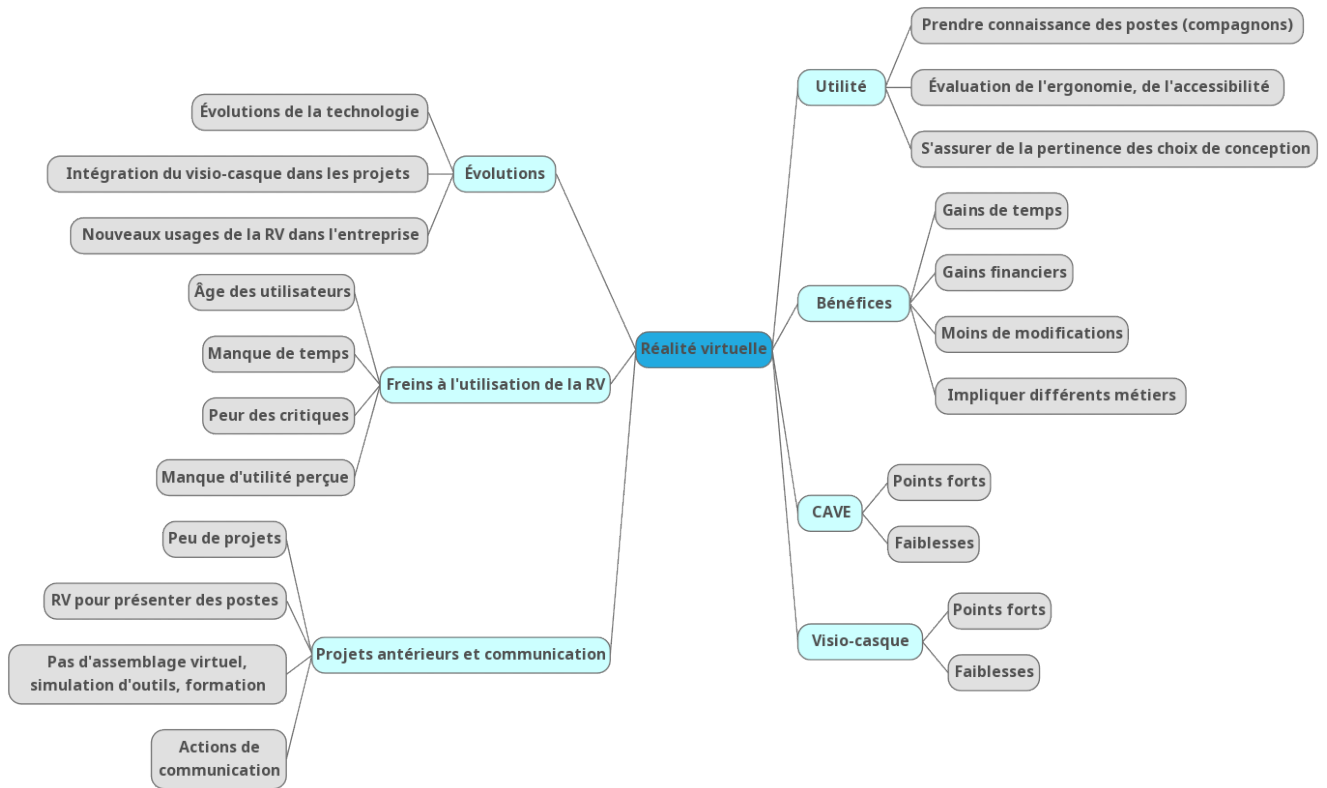


Figure 37. Synthèse des perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle

3.1. Utilité et bénéfices

En premier lieu, les chargés de réalité virtuelle ont souligné l'utilité de la réalité virtuelle de manière générale, ainsi que ses avantages dans les projets de conception (72 références). Pour les deux chargés de réalité virtuelle, cette technologie est utile pour que les compagnons prennent connaissance des futurs postes (« *Pour présenter à ceux qui vont travailler comment sera leur environnement. Ça c'est bien* », chargé de RV²⁴ 1). Ils ont également rapporté des besoins auxquels elle permet de répondre, comme l'évaluation de l'ergonomie du poste et de l'accessibilité des zones de travail (« *On peut travailler sur l'ergonomie du poste* », chargé de RV 2), ou encore, le besoin de s'assurer de la pertinence des choix de conception (« *Ça leur donne une certaine sérénité de pouvoir entrer dans ce qu'ils ont imaginé avant même de pouvoir lancer en fabrication tous leurs outillages* », chargé de RV 2).

Ils ont par ailleurs mis en avant certains avantages de la réalité virtuelle dans les projets de conception. Ils s'accordaient sur le fait qu'elle fait gagner du temps par

²⁴ RV : Réalité virtuelle

comparaison à des revues de projet traditionnelles (« *Je trouve que ces revues de projet en réalité virtuelle ont été bien plus bénéfiques et se sont passées bien bien plus vite que des revues de projet à vingt autour d'une table où ça avance beaucoup moins vite* », chargé de RV 2). Pour le chargé de réalité virtuelle 2, elle permet également des gains financiers, puisqu'elle entraîne moins de modifications sur les postes (« *Parce qu'une fois que c'est lancé en fabrication, ça a un coût si ça va pas* ») et qu'elle permet aux concepteurs de faire des erreurs sans entraîner de surcoût (« *La réalité virtuelle permettra de, entre guillemets, se tromper plus facilement sans engendrer des coûts exorbitants* »). Il a également souligné qu'elle permet d'impliquer différents métiers lors des revues de conception, ce qui n'est pas toujours le cas lors de revues de projet traditionnelles (« *Ce sont des échanges qu'on peut avoir facilement avec l'ensemble des intervenants et des gens qui fabriquent les avions, ce qu'on n'a pas forcément* »).

3.2. Comparaison CAVE et visio-casque

Nous l'avons précisé précédemment, les chargés de réalité virtuelle interrogés sont spécialisés chacun sur un dispositif : le CAVE pour le premier et le visio-casque pour le second. Les entretiens menés ont permis de relever les forces et les faiblesses de ces deux dispositifs (110 références).

Concernant le CAVE, les chargés de réalité virtuelle s'accordaient pour dire que son utilisation est facile pour les utilisateurs (« *La manette, globalement ils savent s'en servir assez rapidement* », chargé de RV 1) et que sa force est de permettre une utilisation collective où tous les utilisateurs sont immergés au même moment dans l'environnement virtuel (« *Dès qu'on est à plusieurs et qu'on veut être tous au même niveau d'information au même moment en regardant à peu près la même zone, le CAVE je pense qu'il est plus adapté* », chargé de RV 1). Le chargé de réalité virtuelle 1 a également souligné que le fait de pouvoir pointer des éléments est un avantage du CAVE (« *Quand on fait voir quelque chose avec sa main, il y a tout le monde qui, globalement, comprend de quoi on cause* »). Il a également mentionné différentes fonctionnalités de RHEA qu'il trouve utiles (« *Les prises de mesure, c'est très bien, pour conforter quand on a des doutes avec les personnes qui sont avec nous dans le CAVE* »).

Les chargés de réalité virtuelle ont également mentionné des faiblesses du CAVE. En premier lieu, ils ont rapporté des symptômes de mal des environnements virtuels, notamment quand les utilisateurs sont passifs et contrôlent pas les déplacements dans l'environnement virtuel (« *Quand on est n'est pas traqué c'est assez désagréable et très vite* », chargé de RV 2). Ils ont tous les deux mentionné la préparation des environnements virtuels à partir de la maquette CAO. Elle est jugée très longue (« *Il y avait beaucoup beaucoup de préparation avant l'utilisation dans le CAVE, c'est-à-dire que c'était des jours de préparation avant de pouvoir mettre un scénario en place dans le CAVE* », chargé de RV 2) et complexe (« *C'était bien plus compliqué parce qu'il fallait avoir une certaine expertise de l'utilisation du logiciel CATIA* », chargé de RV 2). Ils ont également expliqué que le développement du logiciel RHEA a été abandonné et que le logiciel n'est pas mis à jour ; ils le considéraient d'ailleurs comme un logiciel non abouti et désuet (« *RHEA continue à fonctionner, mais sans plus de mises à jour, donc autant te dire que maintenant on est loin de ce qu'on peut faire avec le PC et le masque* »). Le chargé de réalité virtuelle 1 a également insisté sur le manque d'utilisabilité de RHEA, notamment sur son manque de guidage des utilisateurs et le manque de clarté des menus (« *Il n'a*

pas été fini et il a quand même beaucoup de bugs. Il est pas du tout ergonomique. On sait pas ce qu'on fait. On appuie sur des boutons, on ne sait pas trop ce qui va se passer »). Par ailleurs, pour le chargé de réalité virtuelle 2, le coût des sessions est une limite importante du CAVE (« L'utilisation d'un CAVE coûte très très très cher »).

Concernant le visio-casque, le chargé de réalité virtuelle 2 n'a pointé que des forces, alors que le chargé de réalité virtuelle 1 n'a évoqué que des faiblesses. Le chargé de réalité virtuelle 1 a mis en avant le faible coût des sessions par comparaison au CAVE, puisque l'entreprise ne paie pas de frais de location pour les équipements (le casque appartenant à l'entreprise) et puisque les heures de préparation des maquettes par le chargé de réalité virtuelle sont déjà payées par l'entreprise (« Ça leur coûte zéro parce que pour l'instant la Recherche, donc le service auquel j'appartiens, il paie mes heures, quand en face ils ont besoin de faire un peu de préparation »). Il a également mis en avant le prix de la licence du logiciel de réalité virtuelle (« Avec Skyreal, c'est pareil [que la licence du logiciel CATIA®]. On paie une location du logiciel à l'année, qui est pas du tout exorbitante »), ainsi que le prix du matériel, dont il pensait d'ailleurs qu'il était implantable facilement (« Les masques Windows là qui valent 500 € à peu près en moyenne, t'as pas besoin de caméras, t'as besoin de rien en fait et tu restes assis et tu t'immerges dans ton projet, donc pas besoin d'espaces, il faut juste trouver quelques centimètres carrés pour mettre un PC en plus sur son bureau »). Il a enfin souligné la facilité d'utilisation du visio-casque (« C'est très facile d'utilisation »).

Pour le chargé de réalité virtuelle 1, le visio-casque présente des limites. Pour lui, c'est un dispositif qui est conçu pour travailler seul ou à distance ; il s'adapte mal à des situations d'utilisation co-localisées (« Moi je reste convaincu que le casque c'est fait pour travailler tout seul »). Il a également reproché au visio-casque d'être moins immersif, notamment parce que le champ de vision de l'utilisateur est plus restreint que dans le CAVE (« Je ne sais pas quelle conicité on peut avoir là devant, mais on est fortement concentré là devant. Forcément, si on tourne la tête, on voit ce qui se passe, mais quand on est là comme ça dans, dans un CAVE, on a un angle de champ qui est quand même fort ouvert »). Il a également souligné que le visio-casque peut désorienter l'utilisateur, puisqu'il le coupe du monde physique (« On pense qu'on est toujours face au mur où il y a les fenêtres et quand on enlève les lunettes finalement, on en est loin »).

3.3. Projets antérieurs et communication

Les entretiens nous ont également permis de faire un bilan sur les projets antérieurs avec réalité virtuelle, ainsi que sur la communication autour de la réalité virtuelle dans l'entreprise (74 références).

Les chargés de réalité virtuelle ont rapporté que finalement peu de projets avec de la réalité virtuelle ont été menés (« On sait que ça existe, mais je pense que ça reste marginal »). Le chargé de réalité virtuelle 1 a également expliqué que la réalité virtuelle a majoritairement été utilisée pour présenter des postes, et qu'il n'y a eu ni assemblage virtuel (« On présente souvent un bâti abouti avec ses sous-ensembles assemblés dedans. On regarde comment on peut y accéder, mais on ne regarde pas du tout la partie j'apporte une pièce, j'apporte un deuxième, j'apporte un troisième et comment, comment tout ça ça s'imbrique »), ni formation à l'assemblage (« La formation pour dire on apprend à mettre telle pièce à tel endroit dans le bon sens, ça il y a une personne qui a été amateur »), ni simulation d'outils (« Après on n'a pas poussé

très loin tout ce qui est utilisation d'outils »). Les chargés de réalité virtuelle ont également précisé qu'à leur connaissance, le chargé d'affaires outillage était le seul outilleur qui a eu recours à la réalité virtuelle à plusieurs reprises (*« On a dû avoir le cas d'une personne peut-être qui est revenue une deuxième fois sur un autre sujet. Et il me semble qu'il est revenu une troisième fois, là, pour les lunettes »*, chargé de RV 1).

Les chargés de réalité virtuelle ont pourtant mentionné des actions de communication autour de la réalité virtuelle (*« La communication elle passe par le service comm, ça fait quelques fois, en 2018, on a dû être deux fois dans le journal interne, on a fait une présentation au comité de direction, on a fait une semaine déployée sur le site en face lors de la semaine de l'amélioration, pour faire voir ce qu'était la réalité virtuelle »*). Ils envisageaient également que des responsables de service assistent aux revues de projet en réalité virtuelle pour les convaincre de l'utilité de la technologie et les encourager à acquérir un visio-casque (*« Moi je pense que peut-être qu'il faut qu'on forme ou qu'on fasse venir quand il y aura un prochain projet, une prochaine revue de projet, un des responsables et notamment le responsable outillage »*, chargé de RV 2).

3.4. Freins à l'intégration de la réalité virtuelle selon les chargés de réalité virtuelle

Les chargés de réalité virtuelle ont également évoqué certains freins à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets de conception (22 références). Ils ont tous les deux mentionné l'âge des utilisateurs (*« Les cinquas par exemple sont moins à l'aise avec... que les trentenaires ou les vingtenaires ou... Fin voilà, ça c'est indéniable, mais ça c'est une histoire de générations »*, chargé de RV 2). Pour eux, la réalité virtuelle est plus difficile à utiliser et moins attrayante pour des personnes de plus de 50 ans qui auraient peu d'expérience avec l'informatique.

Le chargé de réalité virtuelle 1 a souligné d'autres freins. Il expliquait que le manque de temps et les contraintes temporelles auxquelles sont soumis les concepteurs pourraient les faire renoncer à utiliser la réalité virtuelle (*« Est-ce qu'ils ont pas le temps ? »*). Il pensait également que les concepteurs craignaient que leur travail soit critiqué lors des revues de projet et qu'ils aient à modifier radicalement ce qu'ils ont conçu (*« [Les outilleurs ont peur] qu'on casse, qu'on casse, oui. Qu'on casse ou qu'on critique »*). Enfin, il posait l'hypothèse d'un manque de connaissances sur la réalité virtuelle, ou d'un manque d'utilité perçue (*« Ou on n'a pas encore bien intégré ce que ça peut apporter »*).

3.5. Évolutions de la technologie et de ses usages

Enfin, pour les chargés de réalité virtuelle, la réalité virtuelle et ses usages sont amenés à évoluer (38 références). En premier lieu, ils ont pointé des évolutions technologiques. Le chargé de réalité virtuelle 2 a expliqué que la réalité virtuelle est une technologie en évolution (*« Je pense qu'aujourd'hui la réalité virtuelle c'est encore un produit en développement »*), et que le logiciel SkyReal – qu'ils utilisent aujourd'hui avec le visio-casque – évolue lui aussi (*« Ils sont très à l'écoute de nos besoins. Ils modifient leur logiciel, ils nous envoient les mises en jour sans problème »*). Pour lui, les logiciels et les visio-casques doivent être plus faciles d'utilisation à l'avenir (*« Aujourd'hui, n'importe qui prend un PC, il sait s'en servir sans qu'on lui offre un manuel d'utilisation. C'est tellement intuitif. Bah il faut que demain ces logiciels-là*

soient de la même manière intuitifs »). Il est également envisagé d'intégrer des outils dans les environnements virtuels (« [Besoin d'une] *banque de données pour des petits outillages* »).

Par ailleurs, ils considèrent que les usages du visio-casque dans l'entreprise vont évoluer. Pour eux, les outilleurs peuvent utiliser le visio-casque comme un outil de travail quotidien, qui leur permettrait de visualiser facilement l'outillage qu'ils conçoivent au fur et à mesure de la conception (« *En cours de route pour quand on fabrique, qu'on se mette bien à la place des personnes, voir le rendu que ça peut avoir, fin, pouvoir évoluer dans la scène. Tout seul. Tout seul, c'est très bien* », chargé de RV 1). Il faut alors qu'ils soient autonomes dans son utilisation ; ce qui renvoie à la facilité d'utilisation que pointait le chargé de RV 2, mais également à la préparation des environnements virtuels qui doit être simplifiée, pour que les outilleurs puissent la réaliser seuls (« *Il faut qu'on tende vers le fait de prendre n'importe quelle maquette, de l'injecter de manière très basique comme quand on fait un copier-coller et que ce soit logiciel qui fasse tout à notre place* »). Pour que les outilleurs soient autonomes dans l'utilisation, le chargé de réalité virtuelle 2 pense qu'un visio-casque devait être mis à disposition des potentiels utilisateurs (« *Je pense que si on mettait à disposition des bâtiments au moins un PC par bâtiment, on aurait des gens qui iraient l'utiliser parce que, par curiosité, etc. Et ça ferait émerger des besoins, des envies et une certaine utilisation qu'aujourd'hui on ne suspecte même pas* »).

Le chargé de réalité virtuelle 2 a également mentionné de potentiels nouveaux cas d'usage dans l'entreprise, comme l'assemblage virtuel de pièces pour concevoir des gammes de fabrication (« *Un certain algorithme qui nous permet de pouvoir dire bah on démonte de telle manière, donc si on démonte de telle manière, on construira de telle manière. Et ça c'est des solutions sur lesquelles je suis aussi en train de travailler* », chargé de réalité virtuelle 2) ou la formation de futurs compagnons aux opérations d'assemblage (« *Ce qu'on souhaite demain c'est fournir une aide à la formation, donc via la réalité virtuelle, ou pouvoir carrément, à terme, utiliser la réalité virtuelle comme moyen de formation* »).

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était de recueillir les perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle afin de les confronter avec les résultats des études précédentes.

Leurs perceptions sur l'utilité de la réalité virtuelle rejoignent celles des utilisateurs (Études 1 et 2) et des non-utilisateurs (Étude 3) de nos études précédentes. En effet, ils ont mis en avant l'intérêt de la réalité virtuelle pour prendre connaissance des postes, les évaluer et s'assurer des décisions de conception. Ces avantages de la réalité virtuelle sont également pointés par les utilisateurs des études en situation réelle sur des revues de projet en industrie (Benne, 2013; Berg & Vance, 2017a; Gorecky et al., 2015; Wolfartsberger, 2019). Nos observations des sessions vont également dans ce sens, puisque nous avons relevé une part importante d'explications sur les futures tâches et d'évaluations du poste pendant les sessions.

Les chargés de réalité virtuelle pensent par ailleurs que la réalité virtuelle présente des avantages sur les outils habituellement utilisés. D'abord, ils pensent que les participants sont plus efficaces lors des revues de projet, et donc qu'ils gagnent du temps dans la conception des postes. La réalité virtuelle permet également de faire participer différents métiers aux revues de conception, notamment les compagnons –

ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui. Elle permet également d'effectuer moins de modifications sur les postes une fois implantés, et donc de réduire les coûts des projets. Ces mêmes avantages de la réalité virtuelle sur la CAO ont été mentionnés dans les entretiens conduits dans les précédentes études (Études 1, 2 et 3).

Dans l'étude 2, seuls deux utilisateurs avaient utilisé le CAVE et le visio-casque et avaient pu comparer ces deux dispositifs. Bien qu'ils se consacrent exclusivement à l'un ou l'autre, les chargés de réalité virtuelle connaissent et ont utilisé le CAVE et le visio-casque. Ils ont donc pointé pour chacun des dispositifs des forces et des faiblesses. Concernant le CAVE, ils pensent qu'il est préférable au visio-casque pour une utilisation collective. Ils le jugent également facile d'utilisation lorsqu'il s'agit de se déplacer dans l'environnement. En revanche, ils ont souligné son manque d'utilisabilité pour parcourir les menus, ils ont également rapporté des symptômes de mal des environnements virtuels (lorsque les utilisateurs sont passifs) et ils ont insisté sur les temps de préparation importants des environnements virtuels. À l'inverse des chargés de réalité virtuelle, les utilisateurs qui ont utilisé les deux dispositifs n'ont pas commenté son utilisation collective. Toutefois, une partie des points de comparaison mentionnés par les deux chargés de réalité virtuelle peuvent être rapprochés d'autres résultats des études précédentes. En effet, certains utilisateurs (deux utilisateurs lors de l'étude 1 et un utilisateur lors de l'étude 2) ont rapporté des symptômes de mal des environnements virtuels dans le CAVE. De plus, à l'inverse de ce que pensent les chargés de réalité virtuelle, la majorité des utilisateurs de l'étude 2 a pointé le manque d'utilisabilité de la manette pour effectuer des déplacements dans l'environnement virtuel. Par ailleurs, les temps de préparation des environnements virtuels ne sont pas commentés par les utilisateurs, puisqu'ils n'en ont pas nécessairement conscience, mais ils sont relevés dans des études antérieures sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans des revues de projet en industrie (Benne, 2013; Liu et al., 2014).

Les attitudes des chargés de réalité virtuelle divergent sur le visio-casque. Comme nous le relevons dans la présentation de nos résultats, le chargé de réalité virtuelle 2 n'a pointé que des avantages, alors qu'à l'inverse le chargé de réalité virtuelle 1 n'a pointé que des faiblesses. Pour commencer, le visio-casque est jugé facile d'utilisation, peu coûteux (en comparaison avec le CAVE) et facile à implanter dans les projets. Nous relevons en partie ces aspects dans l'étude 2 : les utilisateurs avaient souligné sa facilité d'utilisation et le chargé d'affaires outillage considérait qu'il était facilement intégrable aux projets, notamment parce qu'il pourrait être utilisé en autonomie, sans se déplacer à IndustriLAB et sans louer de salle ou de matériel. Le coût des sessions avec CAVE a été évoqué dans les études précédentes : le chargé d'affaires de l'étude 2 l'identifiait comme un frein à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets. La facilité d'utilisation du visio-casque est toutefois à nuancer : alors qu'elle est mentionnée dans les entretiens de l'étude 2, le compagnon 2 a également souligné un temps d'apprentissage des commandes important et un besoin d'être formé à l'utilisation de la technologie avant les sessions.

À l'inverse, pour le chargé de réalité virtuelle 1, le visio-casque présente des faiblesses : il s'adapte difficilement à une utilisation collective et il offre un champ visuel plus réduit que le CAVE. Dans l'étude de Wolfartsberger (2019), les utilisateurs qui ne portent pas le visio-casque, mais qui observent l'environnement virtuel sur un écran déporté sont gênés par les mouvements de tête de l'utilisateur qui porte le visio-casque. Les utilisateurs de l'étude 2 n'ont pas fait part de ce type de problèmes et n'ont, de manière générale, pas mentionné de gêne dans le partage du visio-casque. Concernant le fait d'utiliser le visio-casque seul, cette utilisation a par ailleurs été

mentionnée en entretien et de manière positive ; les préparateurs et le chargé d'affaires de l'étude 2 ainsi que certains non-utilisateurs de l'étude 3 ont proposé d'utiliser le visio-casque seul pour vérifier les outillages qu'ils conçoivent. Le chargé d'affaires de l'étude 2 a également fait mention du champ de vision restreint des utilisateurs dans le visio-casque, par comparaison au CAVE.

Dans les études que nous avons conduites précédemment, nous avons identifié certains freins à l'utilisation de la réalité virtuelle dans les projets de conception (Études 1, 2 et 3). Trois freins nous semblent principalement importants à confronter aux perceptions des chargés de réalité virtuelle : il s'agit du manque de connaissances des personnes interrogées sur la réalité virtuelle, du manque d'utilité de la technologie pour traiter certains projets et des contraintes temporelles des concepteurs. Concernant le manque de connaissances des personnes interrogées, les chargés de réalité virtuelle ont mis en avant les actions de communications entreprises par le service R&T pour présenter la technologie. Certains utilisateurs étaient également informés sur la technologie de cette manière : nous avons ainsi noté dans les études précédentes que certaines expériences antérieures des personnes interrogées provenaient de démonstrations, ou qu'elles avaient des informations sur la réalité virtuelle par l'intermédiaire du journal interne. Pourtant, ces actions de communication ne semblent pas avoir touché l'ensemble des personnes interrogées. Nous relevons également qu'une part importante des utilisateurs (notamment les compagnons) et des non-utilisateurs (qui sont les principaux utilisateurs concernés par les revues de projet) ne connaît pas les équipements disponibles dans l'entreprise ou les possibilités offertes par cette technologie. Par ailleurs, les personnes interrogées dans nos études précédentes considéraient que la réalité virtuelle n'était pas utile pour tous les projets ; ils citaient des caractéristiques des projets pour lesquels ils pensaient qu'ils auraient recours à cette technologie. Néanmoins, les chargés de réalité virtuelle n'avaient pas d'informations sur ces motivations. Ils connaissaient toutefois les contraintes temporelles des concepteurs, et ils ont identifié le manque de temps comme une explication possible à la non-utilisation de la réalité virtuelle par les équipes projet.

Enfin, les chargés de réalité virtuelle ont évoqué de potentielles évolutions de la technologie et de ses usages dans l'entreprise. En premier lieu, le logiciel utilisé avec le visio-casque est amené à évoluer. Le chargé de réalité virtuelle 2 ont mentionné de futures modifications pour améliorer son utilisabilité ou pour implanter des outils dans les environnements virtuels. Ces deux besoins avaient par ailleurs été mentionnés par les utilisateurs dans les entretiens suite aux sessions. L'utilisation du visio-casque dans l'entreprise est également amenée à évoluer : les chargés de réalité virtuelle ont évoqué l'utilisation du visio-casque comme un outil de travail, qui serait mis à disposition des outilleurs. Cet aspect a été mentionné à plusieurs reprises dans nos études : à la fois par les préparateurs et le chargé d'affaires de l'étude 2, mais également par le responsable du service dans l'étude 3. Enfin, les chargés de réalité virtuelle envisagent de nouveaux usages de la réalité virtuelle, par exemple pour former les compagnons ou pour vérifier un assemblage, qui sont des usages fréquents et bien identifiés de la réalité virtuelle dans l'industrie (Hamid et al., 2014; Moreau et al., 2004; Mujber et al., 2004).

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 4

L'objectif de cette étude était d'identifier les perceptions des chargés de réalité virtuelle sur la réalité virtuelle et de les mettre en regard des résultats obtenus dans les études précédentes. Nous avons conduit un **entretien semi-directif** avec chaque chargé de réalité virtuelle. Le premier se consacre aux sessions conduites dans le CAVE, alors que le second intervient lors des sessions avec le visio-casque.

Les chargés de réalité virtuelle s'accordent avec les utilisateurs (Études 1 et 2) et les non-utilisateurs (Étude 3) sur **l'utilité** de la réalité virtuelle dans les projets de conception. La réalité virtuelle permet : de **prendre connaissance des postes**, de **l'évaluer** et de prendre des **décisions de conception**. Les chargés de réalité virtuelle ont pointé des **bénéfices** à la réalité virtuelle également évoqués dans les études précédentes : des **gains de temps**, des **gains financiers**, **moins de modifications** sur les postes et **l'implication de différents métiers** dans les revues de projet.

Ils ont par ailleurs identifié les **forces et les faiblesses du CAVE et du visio-casque**. Le CAVE est préféré pour une **utilisation collective**, alors que le visio-casque est considéré comme un **outil de travail** qui pourrait être utilisé régulièrement pas les outilleurs. Ils jugent également que ces deux dispositifs sont **faciles d'utilisation**, ce qui va à l'encontre de certains résultats obtenus avec les utilisateurs dans les études précédentes (Étude 2).

Ils ont souligné que **peu de projets** ont été menés, malgré des **actions de communication**, et que certaines fonctionnalités de la réalité virtuelle n'ont pas été exploitées. Ils ont expliqué le manque d'intégration de la réalité virtuelle dans les projets par l'âge des utilisateurs, le manque de temps, la peur des critiques et le manque d'utilité perçue.

Enfin, ils ont expliqué certaines **évolutions de la réalité virtuelle et de ses usages** dans l'entreprise, notamment des évolutions des logiciels et la mise à disposition de visio-casque.

Ce chapitre clôt les différentes études menées sur l'acceptabilité et sur l'acceptation de la réalité virtuelle dans des projets de conception de poste. Le prochain chapitre est consacré à un cas d'usage fréquent de la réalité virtuelle dans l'industrie : il s'agit de son utilisation pour la formation à l'assemblage

CHAPITRE 5.

ÉTUDE 5 : PROPOSITION ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE D'UN MODÈLE DE L'ACCEPTABILITÉ EN RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LA FORMATION À UNE TÂCHE DE RIVETAGE DANS L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE

1. INTRODUCTION

Cette étude expérimentale visait à identifier des facteurs qui pouvaient avoir un impact sur l'appropriation de la réalité virtuelle. En d'autres termes, nous cherchions à déterminer quelles variables avaient un effet sur les perceptions des utilisateurs à l'égard de la réalité virtuelle ainsi que sur leur intention d'utiliser ce type de technologie.

Plus largement, cette expérimentation visait à évaluer dans quelle mesure les dispositifs de réalité virtuelle que nous étudions pouvaient être acceptables dans des situations de formation dans l'industrie aéronautique. Pour ce faire, nous avons développé une tâche de montage aéronautique en réalité virtuelle, en partenariat avec l'équipe Heudiasyc (UMR–CNRS 7253) de l'UTC (Université Technologique de Compiègne) et Stelia Aerospace (filiale d'Airbus).

Afin de formaliser un scénario, nous avons observé la première semaine de formation des futurs monteurs-ajusteurs, qui allaient être amenés à travailler ensuite sur les postes de fabrication de Stelia Aerospace. La formation s'organisait en deux phases. Dans un premier temps, la place est laissée à la théorie. Les premières semaines ont eu lieu dans une salle de formation, dans laquelle les apprenants assistaient à différentes présentations données par les formateurs. Ces présentations traitaient d'aspects généraux – par exemple, de l'organisation de la production de Stelia Aerospace par gamme d'avions – mais également d'aspects plus techniques tels que les différents outils utilisés dans le montage d'avion. Dans un second temps, la formation s'axait sur la pratique. Les apprenants manipulaient alors pour la première fois, les outils et ils réalisaient leurs premières opérations de montage dans un atelier dédié à la formation.

Pour rendre cette première semaine de formation plus concrète pour les apprenants, nous proposons aux formateurs d'intégrer une tâche de montage aéronautique en réalité virtuelle, simple à réaliser, avant le premier passage des apprenants en atelier. L'implantation de ce type de tâche pouvait permettre aux apprenants de se familiariser avec les outils, avec les opérations qu'ils auraient à réaliser, avec l'ordre de ces opérations et avec les exigences qu'elles requéraient de respecter.

Nous avons formalisé un scénario simple mobilisant différents outils et différentes opérations. Nous proposons donc aux utilisateurs de réaliser une tâche de rivetage. L'environnement virtuel que nous utilisons provenait du projet ANR NIKITA²⁵ (ANR-10-CORD-0014 ; Boccara & Delgoulet, 2015; Carpentier & Lourdeaux, 2014; Delgoulet, Boccara, Carpentier, & Lourdeaux, 2015). Le développement de la tâche

²⁵ NIKITA : *Natural Interactions, Knowledge, Immersive system for Training in Aeronautic*. En français "Interactions Naturelles, Connaissances, système immersif pour la formation aux métiers de l'aéronautique »

que nous évoquons ici a été réalisé par Heudiasyc, en collaboration avec Indira Thouvenin, Domitile Lourdeaux et Samba Drame.

L'expérimentation aurait dû idéalement avoir lieu avec des utilisateurs finaux, c'est-à-dire avec des monteurs-ajusteurs en formation, à qui était destinée l'application en réalité virtuelle développée dans le cadre du projet LEON. Toutefois, afin d'avoir accès à une salle immersive de type CAVE, les passations se sont déroulées à l'UTC à Compiègne. Pour cette raison, et puisque la zone dans laquelle se trouve la salle immersive était en accès restreint, il n'a pas été possible de faire entrer en grand nombre des personnes extérieures à l'UTC. Par ailleurs, il n'aurait pas été possible de faire déplacer les apprenants jusqu'à Compiègne. Nous avons donc réalisé cette étude auprès d'étudiants en cycle ingénieur à l'UTC et auprès d'étudiants en licence de psychologie à l'UPJV. Nous reviendrons plus en détail dans la suite de ce chapitre sur notre échantillon. Nous aborderons également en conclusion de ce chapitre les limites posées par le fait de conduire une étude avec des étudiants lorsqu'ils ne sont pas les utilisateurs finaux d'un outil.

2. OBJECTIFS

L'objectif principal de cette étude était de tester la pertinence d'un modèle étendu de l'acceptabilité des technologies adapté à la réalité virtuelle. Notre second objectif était d'évaluer l'acceptabilité de deux dispositifs de réalité virtuelle pour la formation au montage aéronautique (un visio-casque de type HTC Vive et une salle immersive de type CAVE).

Le modèle étendu d'acceptation des technologies que nous proposons s'appuie sur le modèle d'acceptation des technologies (TAM) de Davis (1989), auquel nous avons ajouté certaines dimensions nous semblant pertinentes à évaluer au regard de la revue de la littérature que nous avons conduite (voir Partie I. Chapitre 4). Une première catégorie de variables concerne certaines caractéristiques des utilisateurs. Une deuxième catégorie de variables renvoie à des dimensions spécifiques à la réalité virtuelle. Enfin, nous nous intéressons également aux différentes dimensions de l'expérience utilisateur (Hassenzahl, 2004).

3. HYPOTHÈSES

Nous présentons ici notre modèle théorique et nos différentes hypothèses.

3.1. Technology Acceptance Model (TAM) (Davis, 1989)

Nous nous appuyons sur le TAM (*Technology Acceptance Model*) (Davis, 1989) pour expliquer les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Ce modèle (voir Partie I. Chapitre 3.2.2.1) explique les intentions d'usage des technologies au travers de deux croyances : l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue (Davis, Bagozzi, & Warshaw, 1989). Aujourd'hui, il fait figure de modèle dominant dans l'étude de l'acceptabilité des technologies, comme l'attestent ses milliers de citations (Hsiao & Yang, 2011).

Plusieurs facteurs expliquent l'intérêt du TAM dans l'étude des intentions d'usage des technologies (Yousafzai et al., 2007a). Premièrement, c'est un modèle parcimonieux et spécifique aux technologies. Cette parcimonie permet aux chercheurs de l'utiliser pour étudier une diversité de technologies et de contextes. Un deuxième avantage du TAM est qu'il repose sur un cadre théorique important et bien

documenté. Enfin, concernant le questionnaire en lui-même, les qualités psychométriques des échelles ont été vérifiées.

Le TAM a été empiriquement validé dans de nombreux contextes et avec des technologies différentes (Lee et al., 2003; Legris, Ingham, & Collerette, 2003; Yousafzai, Foxall, & Pallister, 2007b; Yousafzai et al., 2007a). Il présente également l'avantage de pouvoir être facilement étendu et combiné à d'autres modèles (King & He, 2006; Lee et al., 2003; Marangunic & Granić, 2015; Sharp, 2007).

Les études empiriques mettent en évidence les différentes relations qui existent entre les trois variables du TAM. Généralement, l'utilité perçue est le plus fort prédicteur des intentions d'usage. La facilité d'utilisation a un rôle secondaire : elle a un effet sur l'utilité perçue et donc un rôle indirect sur les intentions d'usage (par ex. Davis et al., 1989; Venkatesh, 1999). Le rôle de la facilité d'utilisation perçue comme prédicteur direct ou indirect des intentions d'usage est débattu (Yousafzai et al., 2007a) puisque certaines études, quant à elles, trouvent un effet direct de cette variable sur les intentions d'usage (e.g. Liu & Yu, 2017; Melas, Zampetakis, Dimopoulou, & Moustakis, 2011).

Pour l'étude des intentions d'usage de la réalité virtuelle, les liens postulés par le TAM sont également confirmés empiriquement. Ainsi, l'utilité perçue a un effet sur les intentions d'usage (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Ísler, 2013). La facilité d'utilisation perçue a également un effet sur l'utilité perçue (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Ísler, 2013). La facilité d'utilisation perçue a un effet direct sur les intentions d'usage, bien qu'il soit moins fort que celui de l'utilité perçue (Tokel & Ísler, 2013).

Dans le cadre de notre étude, nous posons donc les hypothèses suivantes :

H1 : La facilité d'utilisation perçue a un effet positif sur les intentions d'usage.

H2 : L'utilité perçue a un effet positif sur les intentions d'usage.

H3 : La facilité d'utilisation perçue a un effet positif sur l'utilité perçue.

3.2. Modèle de l'expérience utilisateur (UX) (Hassenzahl, 2003, 2008)

Nous avons complété le TAM avec des variables issues du modèle de l'expérience utilisateur proposé par Hassenzahl (2003, 2008). Ce modèle décrit l'expérience utilisateur selon deux grandes dimensions. D'une part, les *qualités pragmatiques* qui renvoient à la capacité d'un système à remplir des buts, en d'autres termes à son utilité et à son utilisabilité. D'autre part, les *qualités hédoniques* qui mettent l'accent sur la réponse à des besoins de l'individu. Les qualités hédoniques sont au nombre de trois :

- la *stimulation*, c'est-à-dire le besoin de nouveauté et de challenge ;
- l'*identification*, c'est-à-dire le besoin de s'exprimer à travers ce que l'on possède ;
- l'*évocation* qui renvoie au fait que les technologies génèrent ou provoquent des souvenirs.

Dans notre étude, nous avons uniquement intégré la qualité pragmatique et la qualité hédonique stimulation. Le besoin d'identification et le besoin d'évocation ne semblaient pas pertinents pour notre étude, puisque nous nous intéressons aux premières utilisations d'une technologie dans un cadre professionnel.

Certaines études (Février, 2011; Martin, Erhel, Jamet, & Rouxel, 2015; Martin, Jamet, Erhel, & Rouxel, 2016; Van Schaik & Ling, 2011) combinent le modèle de l'expérience utilisateur (UX) de Hassenzahl au modèle du TAM.

Parmi elles, les études de Van Schaik & Ling (2011) et de Février (2011) proposent différents niveaux de variables des prédicteurs des intentions d'usage. En premier lieu, ces deux études évoquent des variables expérientielles qui concernent les perceptions des individus (par exemple, sur la beauté ou sur la qualité pragmatique). Ces variables expliquent ensuite des variables d'évaluation, qui réfèrent aux jugements des individus (par exemple, les jugements d'attrait ou d'utilité). Enfin, ces jugements prédisent les intentions d'usage de la technologie.

À notre connaissance, aucune étude n'a cherché à expliquer les intentions d'usage de la réalité virtuelle en combinant le modèle du TAM à celui de l'UX. Seules quelques études en réalité virtuelle (Tcha-Tokey, 2018; Tcha-Tokey et al., 2015, 2015; Tcha-Tokey, Loup-Escande, Christmann, & Richir, 2016) ont croisé différentes dimensions de ces deux modèles, mais elles n'avaient pas pour but d'expliquer les intentions d'usage de la réalité virtuelle.

En nous appuyant donc sur les travaux de Van Schaik & Ling (2011) et de Février (2011) sur des technologies différentes (respectivement une encyclopédie en ligne et un Espace Numérique de Travail), nous proposons de considérer les dimensions de l'expérience utilisateur comme des variables expérientielles. Ces variables influenceraient par la suite des variables de jugement de la technologie. Nous formulons donc les hypothèses suivantes :

H4a : La qualité pragmatique a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.

H4b : La qualité pragmatique a un effet positif sur l'utilité perçue.

H5a : La qualité hédonique stimulation a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.

H5b : La qualité hédonique stimulation a un effet positif sur l'utilité perçue.

3.3. Dimensions propres à la réalité virtuelle : mal des environnements virtuels et présence

Nous avons également intégré le mal des environnements virtuels et la présence à notre modèle d'acceptabilité de la réalité virtuelle. Nous pensons que ces deux variables pouvaient avoir un effet sur les intentions d'usage de ce type de technologies.

Pour Lin & Parker (2007), l'accumulation de symptômes faisant suite à une exposition à un environnement virtuel pourrait dissuader les utilisateurs d'utiliser à nouveau ce type de technologie. La même idée a été montrée empiriquement par Tcha-Tokey (2018) : les résultats des études qu'elle a conduites suggèrent que les symptômes faisant suite à une exposition à un environnement virtuel ont un impact négatif sur l'adoption de la réalité virtuelle.

Par conséquent, concernant l'effet du mal des environnements virtuels, nous formulons l'hypothèse suivante :

H6 : Le mal des environnements virtuels a un effet négatif sur les intentions d'usage.

Par ailleurs, certaines études s'intéressent à une autre dimension spécifique à la réalité virtuelle, la présence, qu'elles intègrent à l'étude de l'acceptabilité (entendue

au sens large) de ce type de technologies (e.g. Benoit et al., 2015; Fornells-Ambrojo et al., 2008; Skopp, Smolenski, Metzger-Abamukong, Rizzo, & Reger, 2014).

Toutefois, à notre connaissance, une seule étude s'intéresse à l'effet de cette variable sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Cette étude de Shin, Biocca, & Choo (2013) intègre la présence pour expliquer les intentions d'usage d'un environnement virtuel de formation. Cette variable explique l'immersion et la confirmation des attentes. À son tour, la confirmation des attentes, avec l'utilité perçue et la facilité d'utilisation perçue détermine les intentions d'usage. Dans cette étude, la présence a donc un effet indirect sur les intentions d'usage, par le biais de la confirmation des attentes.

La présence est considérée comme une dimension centrale dans l'étude de la réalité virtuelle, pertinent à la fois pour sa conception et son évaluation (Lee, 2004; Makransky, Lilleholt, & Aaby, 2017). Cette dimensions, bien que peu étudiée, mérite donc une attention particulière (Mütterlein & Hess, 2017).

Puisque nous n'avons pas intégré la confirmation des attentes dans notre modèle, nous pensons que la présence pouvait avoir un effet direct sur les intentions d'usage. Notre hypothèse était donc la suivante :

H7 : La présence a un effet positif sur les intentions d'usage.

3.4. Caractéristiques des utilisateurs : technophilie et propension à l'immersion

Enfin, les dernières variables que nous avons intégré à notre modèle sont relatives aux caractéristiques des utilisateurs. Nous nous intéressons à la technophilie, c'est-à-dire l'attrait d'un individu pour les nouvelles technologies (Agarwal & Prasad, 1998). Plusieurs études se sont intéressées à l'effet de cette caractéristique des utilisateurs sur l'acceptabilité d'environnements virtuels. Dans une étude concernant l'acceptabilité d'un environnement virtuel permettant de visualiser des produits pour du commerce en ligne, Kim et Forsythe (2010) trouvent un effet significatif de la technophilie sur l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et le plaisir perçue.

Par ailleurs, dans une simulation en réalité virtuelle permettant à des étudiants infirmiers d'utiliser un chariot d'urgence, Fagan, Kilmon, et Pandey (2012) trouvent un effet significatif de la technophilie sur l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et plus directement sur les intentions d'usage. De plus, une étude sur l'acceptabilité de la réalité mixte met en évidence une corrélation positive et significative entre la technophilie et la facilité d'utilisation perçue (Rasimah, Ahmad, & Zaman, 2011).

En nous appuyant sur ces études, nous formulons donc les hypothèses suivantes :

H8a : La technophilie a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.

H8b : La technophilie a un effet positif sur l'utilité perçue.

H8c : La technophilie a un effet positif sur les intentions d'usage.

Pour résumer, le modèle théorique que nous proposons intègre :

- des variables issues du modèle TAM (Davis, 1989) : l'utilité perçue, la facilité d'utilisation perçue et les intentions d'usage ;
- des variables issues du modèle de l'expérience utilisateur d'Hassenzahl (2004) : la qualité pragmatique et la qualité hédonique stimulation.
- des variables spécifiques à la réalité virtuelle : le mal des environnements virtuels et la présence.

- des variables relatives à certaines caractéristiques des utilisateurs : la propension à l'immersion et la technophilie.

La Figure 38 résume nos hypothèses.

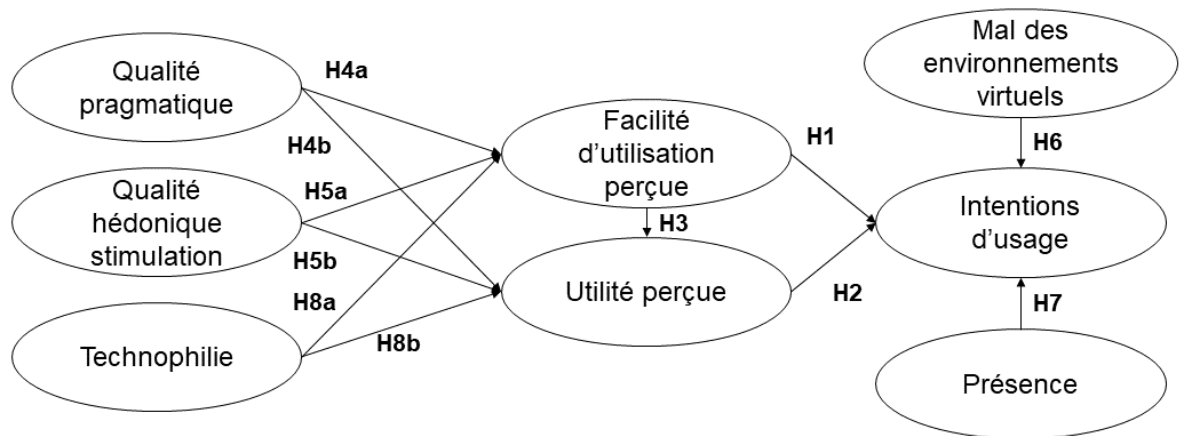


Figure 38. Modèle proposé de l'acceptabilité de la réalité virtuelle

Nous avons conduit une étude expérimentale afin de tester ce modèle théorique. Les parties suivantes sont consacrées à la présentation détaillée de cette étude.

4. MÉTHODE

Nous avons été accompagnée d'étudiants dans le recrutement des participants et dans la réalisation des expérimentations. Trois étudiantes de l'UTC (Laura Liepchitz, Julie Berteaux, et Yuchen Qiu) ont participé au recrutement, et Savinien Colinet, alors étudiant en master 1 Dynamiques sociales, Travail et Organisations de l'UPJV a participé à la réalisation des expérimentations. Il a majoritairement conduit les passations avec le visio-casque.

4.1. Participants

4.1.1. Présentation générale des participants

Les participants à cette étude étaient des étudiants en cycle ingénieur à l'UTC ou en licence de psychologie à l'UPJV. Ils ont été recrutés par le biais d'annonces publiées sur les réseaux sociaux, de présentations lors de cours magistraux et dans des lieux de convivialité comme dans des cafétérias.

Au total, 102 étudiants ont participé à cette étude. *A priori* de l'analyse des données, nous avons exclu de cet échantillon les participants n'ayant pas répondu à la totalité des questionnaires ($n = 9$) et les participants pour lesquels les conditions de passation n'avaient pas été optimales ($n = 4$), à cause de bugs de l'application ou d'interruptions lors de la passation.

Notre échantillon final était composé de 89 participants : 44 hommes et 45 femmes, dont l'âge varie de 18 à 29 ans ($M=21,4$, $ET=2,18$). Les étudiants de l'UTC étaient au nombre de 53, soit 59,6% de notre échantillon. Les étudiants de l'UPJV étaient 36, soit 40,4% de l'échantillon.

Les étudiants de l'UPJV étaient tous inscrits en licence de psychologie. Les étudiants de l'UTC étaient inscrits dans différentes filières. Les deux filières les plus

représentées sont l'ingénierie mécanique ($n = 21$, soit 23,6%) et le génie informatique ($n = 14$, soit 15,7%). Le Tableau 30 reprend la répartition des étudiants dans les différentes filières.

Tableau 30. Répartition des participants selon leur lieu d'étude et leur filière

Lieu d'études	Nombre de participants	Pourcentage
UPJV (licence de psychologie)	36	40,4 %
UTC	53	59,6 %
IM (Ingénierie Mécanique)	21	23,6 %
GI (Génie Informatique)	14	15,7 %
TC (Tronc Commun)	10	11,2 %
GB (Génie Biologique)	3	3,4 %
GSU (Génie des Systèmes Urbains)	2	2,2 %
GP (Génie des Procédés)	1	1,1 %
Hutech (Humanités et Technologies)	1	1,1 %
Philosophie et psychologie (doctorat)	1	1,1 %

Les participants à notre étude jouaient peu aux jeux vidéo et ils utilisaient peu de logiciels 3D (Tableau 31). En effet, 19 participants (21,35% de l'échantillon total) jouaient aux jeux vidéo de manière hebdomadaire. Parmi eux, cinq participants jouaient une fois par semaine (5,6% de l'échantillon total) et 14 participants jouaient plusieurs fois par semaine (15,7% de l'échantillon total).

Parmi les participants jouant aux jeux vidéo, 11 jouaient une fois par semaine ou plusieurs fois par semaine avec une manette (12,36%).

Concernant leur utilisation des logiciels 3D, 10 participants (11,24% de l'échantillon total) utilisent des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) de manière hebdomadaire – de type Autocad, Architectural Desktop, SketchUp ; huit participants (8,99% de l'échantillon total) utilisent des logiciels de dessin en 3D de manière hebdomadaire – de type 3DS max, CATIA, MAYA ; et deux participants (2,25%) utilisent des logiciels de création de scènes interactives 3D et temps réel de manière hebdomadaire – de type Unreal Engine, Unity, OpenScene Graph. La fréquence d'utilisation des jeux vidéo et des logiciels 3D des participants est résumée dans le Tableau 31.

Tableau 31. Participants jouant aux jeux vidéo et utilisant des logiciels 3D de manière hebdomadaire (une ou plusieurs fois par semaine)

	Nombre de participants	Pourcentages
Jeux vidéos	19	21,35 %
Manettes	11	12,36 %
CAO	10	11,24 %
Dessin 3D	8	8,99 %
Scènes 3D	2	2,25 %

Par ailleurs, la majorité des participants ($n = 45$, soit 50,6%) n'a jamais utilisé la réalité virtuelle. Les participants ($n = 44$, soit 49,4%) ayant déjà utilisé la réalité virtuelle ont majoritairement testé des visiocasques ($n = 33$, soit 37,08% de l'échantillon total). Onze participants avaient testé une salle immersive de type CAVE (soit 12,3%). Neuf participants avaient eu l'occasion de tester ces deux types de dispositifs, soit 10,11% de nos échantillons. Enfin, 31,46% ($n = 28$) des participants avaient déjà utilisé le même type de dispositif que celui qui leur a été attribué dans le cadre de notre expérience.

4.1.2. Présentation des deux groupes de participants : visio-casque et CAVE

Un dispositif était attribué aléatoirement aux participants pour réaliser la tâche : un visio-casque (de type HTC Vive) ou un CAVE.

Nous présentons ici la répartition des participants dans ces deux groupes ; 37 participants (soit 41,6 % de l'échantillon total) ont testé le visio-casque et 52 participants ont testé (soit 58,4 %) le CAVE (voir Tableau 32).

Tableau 32. Répartition des participants dans le groupe « CAVE » et dans le groupe « visiocasque »

Dispositif	Nombre de participants	Pourcentage
CAVE	37	41,6 %
Visiocasque	52	58,4 %

Concernant le genre des participants dans chacun des groupes, la répartition dans les deux groupes peut être décrite comme suit :

Tableau 33. Répartition du genre des participants dans les deux groupes expérimentaux

Dispositif	Genre	Nombre de participants	Pourcentage
CAVE	H	25	67,6 %
	F	12	32,4 %
HTC	H	19	36,5 %
	F	33	63,5 %

Notes. H : Homme ; F : Femme

Quant aux filières d'étude des participants des deux groupes, elles sont réparties comme suit :

Tableau 34. Répartition des filières d'étude des participants selon leur groupe expérimental

Dispositif	Filière	Nombre de participants	Pourcentage
CAVE (n = 37)	Ingénierie Mécanique	13	35,1 %
	Génie Informatique	11	29,7 %
	Tronc Commun	7	18,9 %
	Génie Biologique	3	8,1 %
	Hutech (Humanités et Technologies)	1	2,7 %
	Génie des Systèmes Urbains	1	2,7 %
	Génie des Produits	1	2,7 %
Visiocasque (n = 52)	Psychologie	36	69,2 %
	Ingénierie Mécanique	8	15,4 %
	Génie Informatique	3	5,8 %
	Tronc Commun	3	5,8 %
	Génie des Systèmes Urbains	1	1,9 %
	Philosophie et psychologie	1	1,9 %

Cette répartition s'expliquait par le recrutement de nos participants : le CAVE se trouvant à l'UTC, l'ensemble de nos participants appartenait à des filières d'ingénieur. Quant au groupe « visiocasque », une grande partie du recrutement a eu lieu à l'UPJV, ce qui expliquait la proportion importante d'étudiants en licence de psychologie.

4.2. Tâche réalisée en réalité virtuelle

Comme expliqué précédemment, la tâche que les participants devaient réaliser était une tâche simple de montage aéronautique, prenant modèle sur la formation existante des monteurs-ajusteurs que nous avons suivie.

Cette tâche a été développée par l'équipe Heudiasyc (UMR-CNRS 7253) sur le logiciel Unity, en prenant soin à ce que l'ensemble des interactions créées puissent fonctionner à la fois en salle immersive (CAVE) et avec un visio-casque (HTC Vive). La manette du casque HTC Vive était utilisée comme contrôleur pour les deux dispositifs.

L'expérience comprenait deux parties. D'abord, les participants réalisaient une tâche d'entraînement, afin de se familiariser avec le dispositif, avec l'environnement virtuel et avec les différentes commandes. Puis, ils réalisaient la tâche de montage aéronautique. Dans les deux phases de l'expérience, l'environnement virtuel représentait un atelier de fabrication d'une industrie aéronautique.

Pour la phase d'entraînement, l'utilisateur était guidé par le biais de différentes fenêtres de dialogue lui donnant des explications sur les commandes (Figure 39).

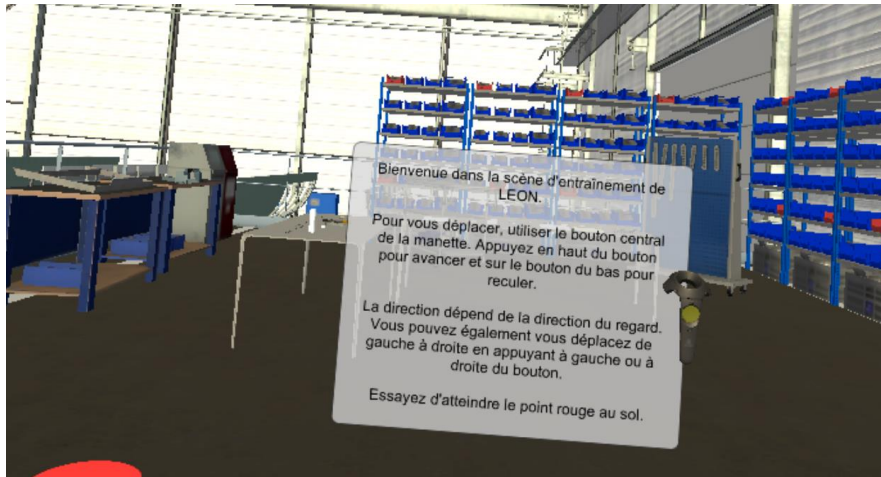


Figure 39. Capture de la phase d'entraînement

La phase d'entraînement se terminait par la présentation d'un tableau indiquant à l'utilisateur la suite d'actions à réaliser. Dès qu'une action était terminée, un tic vert (✓) apparaissait à côté de l'action sur ce tableau, indiquant à l'utilisateur que l'action avait bien été réalisée et qu'il pouvait passer à la suivante.

Différentes interactions étaient possibles :

- pour se déplacer dans l'environnement, l'utilisateur pouvait utiliser les flèches directionnelles de sa manette ou se déplacer naturellement, en faisant quelques pas ;
- pour saisir un objet, l'utilisateur devait approcher sa manette de celui-ci et presser simultanément les deux grips de la manette. Pour reposer l'objet saisi, un second appui était nécessaire et l'objet revenait à sa place initiale ;
- enfin, certaines actions étaient possibles sur les objets (percer un trou, par exemple) en utilisant la gâchette à l'arrière de la manette.

La phase d'entraînement permettait à l'utilisateur d'effectuer chacune des actions décrites précédemment.

Une fois la phase d'entraînement terminée, il était demandé à l'utilisateur de réaliser l'ensemble des tâches indiquées sur le tableau, en s'assurant de bien toutes les réaliser. Les différentes tâches à réaliser sont illustrées dans la Figure 40.

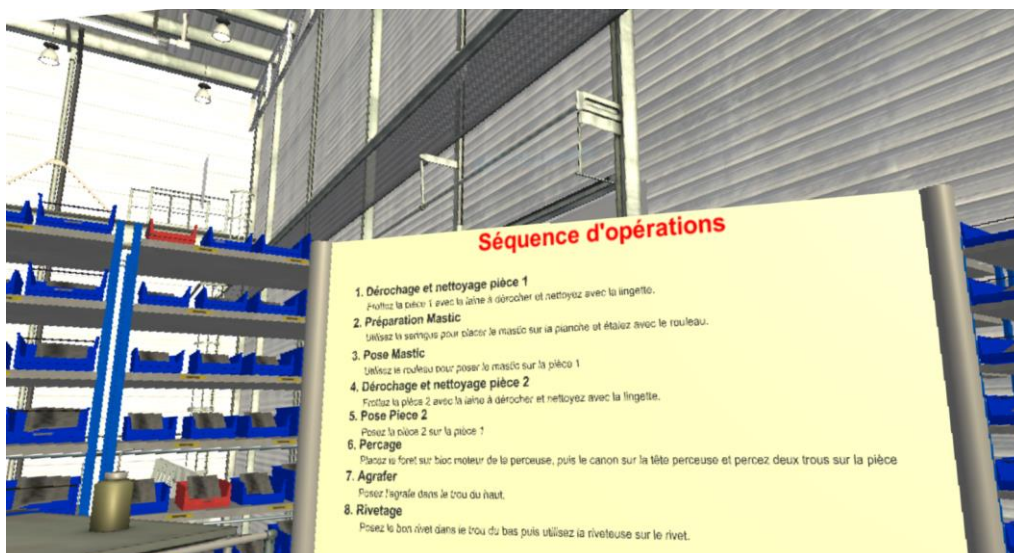


Figure 40. Capture d'écran du tableau

4.3. Données recueillies

Nous avons recueilli différentes données afin de pouvoir tester le modèle de l'acceptabilité de la réalité virtuelle que nous proposons. Le recueil de ces données s'effectuait par le biais de deux questionnaires.

Nous avons pris soin de choisir des outils ayant été traduits et validés en langue française. Les outils que nous avons utilisés dans le cadre de cette expérience sont résumés dans le Tableau 35.

Tableau 35. *Outils utilisés (originaux et traductions françaises)*

Échelles	Nombre d'items	Source	Traduction
Habitudes des jeux vidéo et des logiciels 3D	5	Tcha-Tokey (2018)	
Technophilie	4	Agarwal et Prasad (1998)	Février (2011)
Utilité perçue (UP)	4	Davis (1989)	Mansour & Bouslama (2012)
Facilité d'utilisation perçue (FUP)	4	Davis (1989)	Mansour & Bouslama (2012)
Intentions d'usage (IU)	2	Davis (1989)	Mansour & Bouslama (2012)
Qualité pragmatique (QP)	7	AttrakDiff 2 (Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003)	Lallemant et al. (2015)
Qualité hédonique stimulation (QHS)	7	AttrakDiff 2 (Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003)	Lallemant et al. (2015)
Présence	18	Witmer & Singer (1998)	Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO (2013a)
SSQ	16	Kennedy et al. (1993)	Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO (2013b)

4.4. Procédure

Au moment de leur inscription à l'étude, les participants étaient affectés aléatoirement à un des deux groupes expérimentaux : le groupe HTC, qui testait un visio-casque, et le groupe CAVE, qui testait une salle immersive.

Nous commençons par accueillir les participants en leur donnant des informations sur le projet de recherche, sur les objectifs de ce projet et sur l'expérience

à laquelle ils allaient participer. Après nous être assurés que nos explications étaient bien comprises, nous demandions aux participants leur consentement écrit pour participer à l'étude.

L'expérience se déroulait en trois phases : les participants remplissaient un premier questionnaire, ils effectuaient la tâche en réalité virtuelle sur un des deux dispositifs, puis ils remplissaient un second questionnaire. Le premier questionnaire visait à recueillir des informations sociodémographiques ainsi que des informations sur l'utilisation des jeux vidéo et des logiciels 3D par les participants. Il évaluait également leur propension à l'immersion, leur degré de technophilie et la sévérité des symptômes de mal des environnements virtuels pour établir une ligne de base. Le second questionnaire évaluait la sévérité des symptômes de mal des environnements virtuels après exposition, l'apprentissage de la tâche, la présence, l'expérience utilisateur et l'acceptabilité.

La passation complète, incluant le remplissage des questionnaires et la réalisation de la tâche en réalité virtuelle, durait environ une heure.

5. RÉSULTATS

5.1. Modélisation par équations structurelles de type PLS (*Partial Least Squares*)

Pour nos analyses, nous avons opté pour une modélisation par équations structurelles. Ce type de techniques répond à certaines limites des techniques dites de première génération, telles que les régressions multiples, les régressions logistiques ou les ANOVA (Chin, 1998). En effet, celles-ci présentent l'inconvénient de n'être applicables qu'à des modèles simples (dans le cas des régressions, par exemple, avec une seule variable dépendante) et elles partent du postulat que toutes les variables sont observables et peuvent être mesurées sans erreur (Haenlein & Kaplan, 2004).

La modélisation par équations structurelles a émergé comme une alternative pour remédier à ces limites. Cette deuxième génération de techniques permet une analyse multivariée, c'est-à-dire qu'elle permet d'examiner de manière simultanée les liens entre des variables indépendantes et des variables dépendantes (Hair, Hult, Ringle, & Sarstedt, 2014; Sarstedt, Ringle, Smith, Reams, & Hair, 2014).

Il existe deux types de modélisation par équations structurelles (ou SEM pour *structural equations modeling*) (Haenlein & Kaplan, 2004; Hair, Sarstedt, Hopkins, & Kuppelwieser, 2014; Sarstedt et al., 2014) :

- les équations structurelles basées sur la covariance, dites CB-SEM (*Covariance-Based – Structural Equations Modeling*) ;
- les équations structurelles basées sur la variance (ou les construits), dites PLS-SEM (*Partial Least Squares – Structural Equations Modeling*).

L'approche basée sur la covariance (CB-SEM) vise à minimiser les différences entre la matrice de covariance de l'échantillon et celle prédite par un modèle théorique. Elles s'appuient donc sur des théories bien établies, où les relations entre les variables ont été testées empiriquement. Par conséquent, les CB-SEM sont confirmatoires ; elles visent à confirmer ou à rejeter des théories (Sarstedt et al., 2014).

L'approche basée sur la variance (PLS-SEM) a pour objectif de maximiser la variance des variables dépendantes expliquée par les variables indépendantes

(Haenlein & Kaplan, 2004). Les PLS-SEM sont utilisées pour développer des théories ; elles sont utilisées à des fins exploratoires (Sarstedt et al., 2014).

Les SEM permettent aux chercheurs de construire des modèles qui relient différentes variables inobservables (ou *variables latentes*) construites à partir d'indicateurs (ou *variables manifestes*). On appelle les *variables latentes exogènes* les variables qui servent de variables indépendantes, c'est-à-dire celles qui prédisent d'autres variables. On appelle les *variables latentes endogènes* les variables qui servent de variables dépendantes uniquement (elles sont prédites par d'autres variables) ou qui sont à la fois des variables dépendantes et indépendantes (elles sont prédites par d'autres variables et en prédisent d'autres également).

Chaque construit a un modèle de mesure qui spécifie la relation entre des indicateurs et leurs variables latentes respectives (Hair, Hult, et al., 2014; Sarstedt et al., 2014). Les modèles de mesure peuvent être de deux types : réfléchifs ou formatifs. Les *indicateurs réfléchifs* sont causés par un construit : les mesures reflètent un phénomène. Dans ce cas, les indicateurs sont fortement corrélés les uns aux autres et ils sont interchangeable. Il est possible de supprimer un indicateur sans compromettre la validité du construit. À l'inverse, les *indicateurs formatifs* causent le construit. Les indicateurs mesurent des aspects spécifiques. Pris ensemble, les indicateurs déterminent le sens du construit. Dans ce cas, supprimer un indicateur peut altérer la validité du construit.

Dans les SEM, trois jeux d'équations sont calculés (Haenlein & Kaplan, 2004) :

- le premier relie les indicateurs à leur variable latente exogène ;
- le deuxième relie les indicateurs à leur variable latente endogène ;
- le troisième relie les variables exogènes aux variables endogènes.

Les CB-SEM commencent par estimer les paramètres du modèle, puis les valeurs estimées pour chacune des variables latentes en les régressant sur l'ensemble des indicateurs (Haenlein & Kaplan, 2004). Le fonctionnement des PLS-SEM diffère (Haenlein & Kaplan, 2004). D'abord, les poids entre les indicateurs et leurs variables latentes sont calculés. Puis, en se basant sur ces poids, les valeurs de chaque variable latente sont calculées. Enfin, ces valeurs sont utilisées pour déterminer les coefficients pour les relations structurelles.

Le fonctionnement même des PLS-SEM présente un biais. Ce biais résulte du fait que les indicateurs observés comprennent toujours un certain degré d'erreur de mesure. Or, comme les scores des variables latentes sont issues des scores des indicateurs, cette erreur se répercute indubitablement dans les coefficients qui sont estimés en utilisant ces scores (Hair, Hult, et al., 2014). Les PLS-SEM ont donc tendance à surestimer les relations du modèle de mesure et à sous-estimer les relations du modèle structurel (Haenlein & Kaplan, 2004; Hair, Hult, et al., 2014). Ce biais ne disparaîtrait que si le nombre d'indicateurs et le nombre d'observations étaient infinis. Les scores de la variable latente se rapprocheraient alors de leurs valeurs réelles. Ce biais peut être toutefois réduit si le nombre d'indicateurs ou le nombre d'observations augmentent (Hair, Hult, et al., 2014).

Malgré cette limite, les PLS présentent certains avantages qui les rendent préférables aux CB-SEM dans certaines conditions (Hair, Hult, et al., 2014) :

- elles fonctionnent efficacement avec des échantillons faibles – alors que les CB-SEM requièrent des tailles d'échantillons importantes de 100 voire 200 observations (Haenlein & Kaplan, 2004) ;
- leurs conditions d'application sont moins exigeantes concernant la distribution des données (non-normalité des données) ;
- elles peuvent inclure des indicateurs formatifs (Haenlein & Kaplan, 2004).

Ce type d'équations structurelles est répandu dans l'étude de l'acceptabilité des technologies, comme l'attestent les revues de la littérature sur l'UTAUT (M. D. Williams, Rana, & Dwivedi, 2015) et sur le TAM (Lee et al., 2003).

À notre connaissance, le modèle exact que nous proposons n'a pas été testé empiriquement auparavant. Les relations entre les variables que nous souhaitons tester n'ont donc pas été toutes clairement identifiées par la littérature. Par ailleurs, notre échantillon est composé de 89 participants, ce qui est bien en deçà des 200 participants recommandés pour l'application d'équations structurelles basées sur la covariance. Enfin, une grande majorité de nos variables ne suit pas une distribution normale. Pour ces raisons, nous avons opté pour des équations structurelles de types PLS.

Cette analyse s'effectue en deux étapes (Hair, Hult, et al., 2014). D'abord, il convient d'évaluer l'adéquation du modèle de mesure (qui relie les indicateurs à leurs variables latentes). Puis, il faut évaluer les résultats du modèle structurel. Nous avons réalisé nos analyses sur les logiciels JASP 0.9 (JASP Team, 2018) et SmartPLS 3 (Ringle et al., 2015).

5.2. Modèle de mesure

Le modèle de mesure que nous évaluons était majoritairement réflectif. Dans notre modèle, les indicateurs étaient causés par un construit ; ils reflétaient ce construit. Par exemple, les quatre items « Apprendre à utiliser la réalité virtuelle est facile, « Mes interactions avec la réalité virtuelle sont claires et compréhensibles », « Il me serait facile de devenir compétent dans l'utilisation de la réalité virtuelle » et « Je trouve que la réalité virtuelle est facile à utiliser » reflétaient le construit *facilité d'utilisation perçue*. Si une personne jugeait la réalité virtuelle facile d'utilisation, les scores qu'elle attribuerait à chacun de ces items seraient élevés. Nous pourrions également relever une forte corrélation entre ces items.

Par ailleurs, notre modèle était hiérarchique, c'est-à-dire que certaines de nos variables latentes (deux exactement : la présence et le mal des environnements virtuels) étaient composées de plusieurs dimensions reliées entre elles (Becker, Klein, & Wetzels, 2012). La validation des questionnaires de présence (Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO, 2013a) et de mal des environnements virtuels (Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO, 2013b) en français ainsi que les analyses factorielles effectuées sur ces versions nous ont permis de déterminer les différentes dimensions de ces construits ainsi que les items se rattachant à chacune. Nous avons construit un modèle hiérarchique dit réflectif-formatif ou de type II (Becker et al., 2012; Hair, Hult, et al., 2014), où des construits de second ordre (la présence et le mal des environnements virtuels) étaient formés par des construits de premier ordre (les différents facteurs de la présence et du mal des environnements virtuels) qui étaient mesurés par des indicateurs réflectifs (les items des deux questionnaires).

Pour la présence, cinq dimensions ont été formées :

- le réalisme ;
- la possibilité d'agir ;
- la qualité de l'interface ;
- la possibilité d'examiner ;
- l'auto-évaluation de la performance.

Pour le mal des environnements virtuels, la version anglaise s'organise autour de trois facteurs (Kennedy & Lane, 1993) : les symptômes de nausée, les symptômes oculomoteurs et les symptômes de désorientation. La version française semble davantage s'organiser en deux facteurs (Bouchard, Robillard, & Renaud, 2007) que nous avons repris dans notre modèle :

- les symptômes de nausée ;
- les symptômes oculomoteurs.

Plusieurs approches ont été proposées pour l'estimation des modèles hiérarchiques. L'approche la plus répandue est l'approche avec indicateurs répétés (Wilson & Henseler, 2007). Dans cette approche, les indicateurs des construits du premier niveau (les différentes dimensions d'un construit) sont réutilisés pour le construit de deuxième niveau (la variable latente). Le principal inconvénient de cette méthode est que si la variable manifeste est endogène (prédite par d'autres variables), la totalité de sa variance est expliquée par ses indicateurs, ce qui peut neutraliser l'effet d'une variable externe (Becker et al., 2012; Duarte & Amaro, 2018). Par ailleurs, cette approche fonctionne mieux lorsque le nombre d'indicateurs entre les construits de premier ordre est égal (Duarte & Amaro, 2018).

Lorsque le nombre d'indicateurs entre les construits est différent et lorsque la variable manifeste est endogène, il est recommandé d'utiliser une approche en deux étapes (Becker et al., 2012; Duarte & Amaro, 2018). La première étape consiste à obtenir des scores pour les construits du premier niveau. Lors de la deuxième étape, les scores obtenus servent d'indicateurs pour le construit de deuxième niveau. C'est cette approche que nous avons choisi d'utiliser pour évaluer notre modèle hiérarchique.

Lors de la première étape, nous avons donc construit un modèle sans la présence et le mal des environnements virtuels (les construits de second ordre), mais uniquement avec les différents construits de second ordre. Nous avons commencé par évaluer les différents construits en termes de consistance interne, de validité convergente et de validité discriminante (Hair, Hult, et al., 2014).

Pour mesurer la consistance interne de nos échelles, nous avons utilisé un indicateur de fiabilité composite (CR, *composite reliability*) et des alphas de Cronbach. Il était attendu des valeurs supérieures à 0,70 pour ces deux indicateurs (Hair, Hult, et al., 2014). Quelques items ont dû être supprimés afin d'améliorer la qualité de certains construits.

Il s'agissait de quatre items :

- l'item 1 de l'échelle Qualité pragmatique qui présentait une saturation très basse de .27 ;
- les items 3 et 6 de l'échelle Qualité hédonique stimulation, qui présentaient des saturations très basses, respectivement de .38 et de .28, en deçà des .40 recommandés pour conserver un item (Hair, Hult, et al., 2014) ;

- l'item 12 de la sous-échelle Possibilité d'examiner du questionnaire de présence qui posait des problèmes de validité discriminante : il saturait à la fois pour cette échelle (à .50) et pour la sous-échelle Réalisme (à .50)

Pour s'assurer de la validité convergente de nos échelles, nous avons calculé des AVE (*average variance extracted*) qui permet de déterminer, en moyenne, la variance du construit expliquée par les indicateurs. On recommande des AVE supérieurs à .50 (Hair, Hult, et al., 2014).

Le Tableau 36 indique les valeurs des AVE, de la fiabilité composite et des alphas de Cronbach pour chacune des sous-échelles. Les AVE respectaient le seuil des .50 recommandés pour toutes les échelles (.49 pour la sous-échelles Possibilité d'agir), exceptés pour les échelles Réalisme, Nausée et Oculomoteur. Les alphas de Cronbach étaient supérieurs à 0.70, exceptés pour les échelles Possibilité d'agir, Possibilité d'examiner, Qualité de l'interface, Nausée et Oculomoteur. Toutefois, les alphas de Cronbach sont sensibles au nombre d'items par échelle et leur utilisation repose sur le postulat d'une fiabilité équivalente entre les items. Or, les PLS-SEM priorisent les indicateurs selon leur fiabilité individuelle. Pour ces raisons, certains auteurs recommandent de s'appuyer sur la fiabilité composite davantage que sur les alphas de Cronbach (Hair, Hult, et al., 2014). Pour nos échelles, dans ce cas, seules les sous-échelles Nausée et Oculomoteur présentaient des valeurs de CR en dessous des .70 recommandés.

Tableau 36. *Fiabilité et validité convergente*

	AVE	Composite Reliability	Cronbach Alpha
Possibilité d'agir	.49	.79	.65
Possibilité d'examiner	.54	.67	.22
FUP	.78	.93	.91
IU	.88	.94	.87
Qualité de l'interface	.53	.77	.55
Nausée	.14	.46	.62
Oculomoteur	.27	.39	.52
Auto-évaluation de la performance	.77	.87	.70
QHS	.57	.87	.82
QP	.52	.84	.77
Réalisme	.42	.83	.77
Technophilie	.77	.93	.91
UP	.66	.88	.82

Note. Les valeurs en gras respectent les seuils recommandés.

Pour vérifier la validité discriminante de nos échelles, nous nous appuyons sur le critère de Fornell-Larcker (Fornell & Larcker, 1981). Il s'applique en comparant les racines carrées des AVE de chaque construit avec les corrélations de ce construit avec les autres du modèle. Dans un même tableau, sont calculées les corrélations entre les différents construits et on indique en diagonale les racines carrées des AVE. On s'assure ensuite que les valeurs de la diagonale (les AVE) sont bien supérieures au valeur à l'horizontale et à la verticale (les corrélations). L'ensemble de nos sous-échelles respectaient ce critère. Les valeurs sont reprises dans le Tableau 37.

Tableau 37. *Validité discriminante*

	AGIR	EXAM	FUP	IU	INTERF	NAU	OCULO	PERF	QHS	QP	REAL	TECHN	UP
AGIR	.70												
EXAM	.54	.73											
FUP	.54	.47	.88										
IU	.33	.29	.40	.94									
INTERF	.45	.28	.43	.20	.73								
NAU	-.01	.04	-.18	-.35	-.07	.38							
OCULO	-.25	-.15	-.27	-.26	-.13	.14	.43						
PERF	.62	.53	.59	.34	.35	-.11	-.38	.87					
QHS	.08	.12	.09	.20	.07	.10	-.16	.13	.75				
QP	.60	.49	.68	.34	.53	-.16	-.25	.62	.14	.67			
REAL	.54	.35	.29	.42	.23	.00	-.24	.56	.41	.34	.65		
TECHN	.42	.19	.35	.41	.28	-.25	-.06	.34	-.09	.37	.19	.88	
UP	.35	.39	.34	.44	.30	-.11	-.23	.39	.41	.33	.45	.26	.81

Note. Les valeurs en diagonale sont les racines carrées des AVE.

AGIR : possibilité d'agir ; EXAM : possibilité d'examiner ; FUP : facilité d'utilisation perçue, IU : intentions d'usage ; INTERF : qualité de l'interface ; NAU : nausée ; OCULO : oculomoteur ; PERF : auto-évaluation de la performance ; QHS : qualité hédonique stimulation ; QP : qualité pragmatique ; REAL : réalisme ; TECHN : technophilie ; UP : utilité perçue

Pour l'estimation des modèles hiérarchiques, la seconde étape requérait d'inclure les construits de premier ordre. Afin d'intégrer ces construits au modèle, les scores des variables latentes (les construits de second ordre) étaient calculés et faisaient office d'items uniques pour les construits de premier ordre. Pour notre modèle, la présence était formée par cinq indicateurs, qui étaient les scores calculés pour la Possibilité d'agir, la Qualité de l'interface, la Possibilité d'examiner, la Performance, et le Réalisme. Le mal des environnements virtuels était formé de deux indicateurs, qui étaient les scores de Nausée et d'Oculomoteur.

Les construits de second-ordre ainsi formés devaient être évalués de la même manière que des construits formatifs. Différentes évaluations sont recommandées afin de garantir que les indicateurs formés avec les scores des premier-ordre contribuent bien aux construits de second-ordre (Duarte & Amaro, 2018). La validité des indicateurs et la validité du construit doivent être évaluées. Pour la validité des indicateurs, nous avons commencé par vérifier les poids de chacun. Il est recommandé d'avoir des poids supérieurs à .1 et il est nécessaire d'effectuer un bootstrapping afin de vérifier la significativité de ces poids (Duarte & Amaro, 2018). L'ensemble de nos indicateurs avaient des poids supérieurs à .1, excepté l'indicateur Possibilité d'agir du construit Présence. Les deux indicateurs du construit Mal des simulateurs avaient des poids significatifs, mais seul l'indicateur Réalisme du construit Présence respectait ce critère. Ce manque de significativité des indicateurs peut s'expliquer par leur nombre ; dans le cas de poids non significatifs des indicateurs, il est recommandé de vérifier que leur saturation est supérieure à 0.50 (Hair, Hult, et al., 2014). Les indicateurs présentaient une saturation supérieure à 0.50, excepté l'Auto-évaluation de la performance que nous avons choisi de conserver pour garantir la validité de contenu de notre construit Présence. Le Tableau 38 résume le poids des construits de premier-ordre, leur saturation et la significativité de leurs poids

Tableau 38. *Poids, saturation et significativité des construits de premier-ordre*

Construits de second-ordre	Construits de premier-ordre	Poids	Saturation	t
Présence	Possibilité d'agir	.09	.73	0.29
	Possibilité d'examiner	.24	.63	0.85
	Qualité de l'interface	.11	.43	0.59
	Auto-évaluation de la performance	.13	.74	0.52
	Réalisme	.69	.92	3.10**
Mal des simulateurs	Nausée	.80	.87	3.57**
	Oculomoteur	.50	.61	1.96*

Note. Bootstrapping avec 5 000 échantillons.

** Significatif à $p < .01$; * Significatif à $p < .05$

Pour s'assurer de l'absence de colinéarité entre les indicateurs, nous avons calculé le VIF (*Variance Inflation Factor*), qui est un indicateur dont la racine carrée exprime l'augmentation de l'erreur-type en présence de colinéarité (Tableau 39). Pour s'assurer de l'absence de colinéarité des indicateurs, on attendait donc un VIF faible. Il est recommandé qu'il soit inférieur à 5 (Hair, Hult, et al., 2014).

Tableau 39. *Valeurs des VIF (Variable Inflation Score) pour les différents construits de premier-ordre*

Indicateurs	VIF
Possibilité d'agir	1.70
Possibilité d'examiner	1.53
Qualité de l'interface	1.20
Auto-évaluation de la performance	1.90
Réalisme	1.45
Nausée	1.01
Oculomoteur	1.01

Pour s'assurer de la validité discriminante du construit, les corrélations entre ces construits de second-ordre et les autres construits doivent être inférieures à .71 (MacKenzie, Podsakoff, & Jarvis, 2005). Les corrélations entre la Présence et le Mal des simulateurs et les autres construits étaient toutes inférieures à .71, montrant une bonne validité discriminante de ces deux construits (Tableau 40).

Tableau 40. *Corrélations entre les construits de second-ordre et les autres construits du modèle*

	Présence	Mal des simulateurs
Mal des simulateurs	-.17	-
Présence	-	-.17
UP	.50	-.19
FUP	.45	-.29
IU	.46	-.41
QHS	.35	.04

	Présence	Mal des simulateurs
QP	.54	-.29
Technophilie	.27	-.23

5.3. Modèle structurel : test du modèle d'acceptabilité de la réalité virtuelle proposé

Après avoir confirmé la fiabilité et la validité de la mesure de nos construits, nous nous avons traité les résultats de l'évaluation de notre modèle structurel et les relations entre les construits. Afin de déterminer si les liens postulés étaient significatifs, nous avons procédé à un bootstrapping sans changement de signe avec 5 000 échantillons, recommandé par Hair, Ringle, et Sarstedt (2011). Le Tableau 41 reprend nos hypothèses, les coefficients obtenus ainsi que leur significativité. Notre modèle explique 47% de la variance dans la facilité d'utilisation perçue, 31% de la variance dans l'utilité perçue et 42% de la variance dans les intentions d'usage.

Tableau 41. Résultats du modèle structurel

Hypothèses	Coefficients	t
H1. La facilité d'utilisation perçue a un effet positif sur les intentions d'usage.	.09	0.76
H2. L'utilité perçue a un effet positif sur les intentions d'usage.	.20	1.96*
H3. La facilité d'utilisation perçue a un effet positif sur l'utilité perçue.	.16	0.97
H4a. La qualité pragmatique a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.	.64	8.01**
H4b. La qualité pragmatique a un effet positif sur l'utilité perçue.	.11	0.72
H5a. La qualité hédonique stimulation a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.	.01	0.10
H5b. La qualité hédonique stimulation a un effet positif sur l'utilité perçue.	.40	2.85**
H6. Le mal des environnements virtuels a un effet négatif sur les intentions d'usage.	-.26	2.53*
H7. La présence a un effet positif sur les intentions d'usage.	.22	1.86
H8a. La technophilie a un effet positif sur la facilité d'utilisation perçue.	.10	1.18
H8b. La technophilie a un effet positif sur l'utilité perçue.	.20	2.05*
H8c. La technophilie a un effet positif sur les intentions d'usage.	.20	1.81

Note. Bootstrapping avec 5 000 échantillons.

** Significatif à $p < .01$; * Significatif à $p < .05$

Cinq de nos hypothèses ont été confirmées. Nos premiers résultats concernent les variables issues du TAM. Nos résultats montrent que l'utilité perçue a un effet significatif sur l'intention d'utiliser la réalité virtuelle, ce qui confirme notre hypothèse

1. Au contraire, la facilité d'utilisation perçue n'a d'effet significatif ni sur les intentions d'usage ni sur l'utilité perçue. Ces résultats infirment nos hypothèses 2 et 3.

Les résultats suivants incluent des variables issues du modèle de l'expérience utilisateur. Dans notre étude, la qualité pragmatique a un effet significatif sur la facilité d'utilisation perçue, mais son effet n'est pas significatif sur l'utilité perçue. Ces résultats confirment l'hypothèse 4a et infirment l'hypothèse 4b. À l'inverse, la qualité hédonique stimulation a un effet significatif sur l'utilité et son effet n'est pas significatif sur la facilité d'utilisation perçue. L'hypothèse 5b est donc confirmée, alors que l'hypothèse 5a est infirmée.

Nous avons également étudié l'effet de variables spécifiques à la réalité virtuelle. Dans notre étude, le mal des environnements virtuels a un effet direct et négatif sur les intentions d'usage, alors que la présence n'a pas d'effet sur celles-ci. Par conséquent, l'hypothèse 6 est confirmée, mais l'hypothèse 7 est infirmée.

Pour finir, nous nous sommes intéressée à l'effet de la technophilie sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Nos résultats montrent qu'elle a un effet significatif sur la facilité d'utilisation perçue. En revanche, ses effets sur la facilité d'utilisation perçue et les intentions d'usage ne sont pas significatifs.

La Figure 41 reprend le modèle de l'acceptabilité que nous proposons en mettant en évidence les liens significatifs entre les différentes variables ainsi que les coefficients de ces liens.

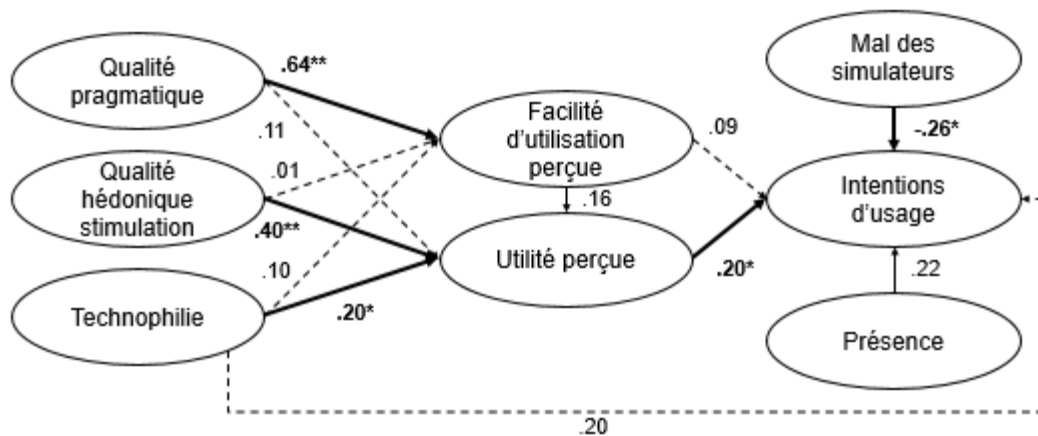


Figure 41. Modèle structurel évalué de l'acceptabilité de la réalité virtuelle

6. DISCUSSION

Nos résultats montrent l'intérêt de combiner des variables issues du TAM, des variables issues des modèles de l'expérience utilisateur, des variables spécifiques à la réalité virtuelle et des variables relatives aux caractéristiques des utilisateurs pour expliquer l'acceptabilité de la réalité virtuelle en formation.

Notre première hypothèse supposait que la facilité d'utilisation perçue avait un effet significatif sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Nos résultats ne confirment pas cette hypothèse, alors que cet effet est habituellement observé dans les études sur l'acceptabilité des environnements virtuels (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Isler, 2013). Néanmoins, ce

résultat n'est pas surprenant. L'instabilité de l'effet de la facilité d'utilisation perçue est connue : elle a d'ailleurs été pointée dans deux méta-analyses menées sur les résultats des études qui mobilisent le TAM (King & He, 2006; Lee et al., 2003). Nous pensons que c'est l'importance de l'utilité perçue qui peut expliquer ce résultat. En effet, certaines études montrent que l'utilité perçue est un plus fort prédicteur des intentions d'usage que la facilité d'utilisation perçue (e.g., Davis, 1989; Davis et al., 1989). Dans le cas de technologies utilitaires, ayant un usage professionnel, on peut s'attendre à ce que l'utilité perçue prenne encore davantage d'importance (Van der Heijden, 2004). Nous pensons donc que pour nos participants, qui se projetaient dans un usage professionnel de la réalité virtuelle, l'utilité perçue a primé au détriment de la facilité d'utilisation perçue.

L'effet significatif de l'utilité perçue sur les intentions d'usage valide notre deuxième hypothèse. En d'autres termes, c'est ici le sentiment que la technologie est utile qui motive son utilisation future ; le sentiment qu'elle est facile d'utilisation ayant peu d'importance. Cet effet observé de l'utilité perçue sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle rejoint les résultats des études antérieures sur les environnements virtuels (Bertrand & Bouchard, 2008; Chow et al., 2012; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Isler, 2013). Cet effet est également observé pour des technologies variées telles que des logiciels de traitement de texte, les e-mails ou encore les technologies de télémédecine (voir Yousafzai et al., 2007a, pour une méta-analyse sur les résultats des études avec le TAM).

Notre troisième hypothèse postulait que la facilité d'utilisation perçue aurait un effet significatif sur l'utilité perçue. Cette hypothèse n'a pas été validée. Les études antérieures montrent pourtant un effet significatif de cette variable sur l'utilité perçue quand son effet sur les intentions d'usage est absent : on parle d'un effet indirect de la facilité d'utilisation perçue ou d'un effet médiatisé par le biais de l'utilité perçue (Davis et al., 1992, 1989). Dans notre étude, la facilité d'utilisation ne prédit ni l'utilité perçue ni les intentions d'usage de la réalité virtuelle. Nous envisageons deux explications. La première explication est peut-être à chercher du côté de variables que nous n'avons pas incluses dans le modèle et qui pourraient, dans le cas de l'acceptabilité de la réalité virtuelle, être plus importantes que la facilité d'utilisation perçue. Nous pensons notamment au plaisir perçu, dont certaines études montrent qu'elle explique, conjointement avec l'utilité perçue, les intentions d'usage d'une technologie (par exemple, Balog & Pribeanu, 2010; Lee, Chung, & Lee, 2013; Van der Heijden, 2004). Notre seconde explication concernerait plutôt l'effet de la facilité d'utilisation perçue sur d'autres variables. En effet, il est possible qu'elle ait un effet sur des variables non incluses dans l'étude. Par exemple, elle pourrait avoir un effet sur le plaisir perçu mentionné auparavant (on pourrait s'attendre ici à un effet de la facilité d'utilisation sur les intentions d'usage médiatisé par le plaisir perçu). Nous pensons également qu'elle pourrait avoir un effet sur la présence : un dispositif facile à utiliser mènerait à un « oubli » du dispositif technique et par là même à un sentiment de présence (entendue comme un sentiment de non-médiation).

Nos hypothèses suivantes concernaient les effets des variables issues du modèle de l'expérience utilisateur proposé par Hassenzahl (2003, 2008). Nous nous sommes intéressée aux effets de la qualité pragmatique et de la qualité hédonique stimulation. Nos résultats suggèrent que la facilité d'utilisation perçue et que l'utilité perçue dépend de conditions différentes. La facilité d'utilisation perçue est influencée par la qualité pragmatique – ce qui valide notre hypothèse 4a – mais pas par la qualité hédonique stimulation – ce qui infirme notre hypothèse 5a. À l'opposé, l'utilité perçue

est influencée par la qualité hédonique stimulation – ce qui confirme notre hypothèse 5b – mais n'est pas influencée par la qualité pragmatique – ce qui infirme notre hypothèse 4b. Il semble que pour leur perception de la facilité d'utilisation de la réalité virtuelle, les utilisateurs s'appuient sur l'atteinte de leurs objectifs (c'est-à-dire la qualité pragmatique de la réalité virtuelle). Si l'utilisation de la technologie leur permet d'atteindre leurs objectifs – ici, s'il leur a été possible de réaliser la tâche d'assemblage – les utilisateurs la percevront comme facile d'utilisation. Au contraire, pour juger de l'utilité perçue de la réalité virtuelle, les utilisateurs s'appuient sur leur besoin d'être stimulés par la technologie (c'est-à-dire sur la qualité hédonique stimulation). Pour qu'ils la perçoivent comme utile, l'utilisation doit être stimulante. Cet effet peut s'expliquer par la nature même de l'application évaluée dans cette étude ; puisqu'elle est utilisée pour la formation au montage aéronautique, les utilisateurs pourraient avoir besoin de trouver la tâche à réaliser stimulante pour juger de l'utilité de l'application.

Concernant les caractéristiques spécifiques à la réalité virtuelle, nous nous intéressons aux effets du mal des environnements virtuels et de la présence sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Nos résultats montrent que le mal des environnements virtuels a un effet négatif sur les intentions d'usage – ce qui confirme l'hypothèse 6. En d'autres termes, plus les symptômes que développent les utilisateurs sont sévères, moins ils ont l'intention d'utiliser à nouveau la réalité virtuelle. Ce résultat est en accord avec certaines prévisions faites par certains auteurs, sans avoir été expérimentalement testé (Frank Biocca, 1992; Diels & Howarth, 2013; J. J. W. Lin & Parker, 2007). Cependant, l'effet de la présence sur les intentions d'usage n'est pas significatif – ce qui infirme l'hypothèse 7. Ce résultat s'explique par l'effet peu connu de la présence sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle. Bien qu'il est considéré que la présence doit jouer un rôle important (Mütterlein & Hess, 2017), nous n'avons pas d'informations sur ses effets. En effet, nous avons postulé qu'elle avait un effet direct sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle, mais il est possible qu'elle opère autrement. Par exemple, elle pourrait être un antécédent des perceptions des utilisateurs sur la technologie ; il faudrait qu'ils aient éprouvé un sentiment de présence pour percevoir la technologie comme utile ou comme facile à utiliser. Il est également possible qu'elle ait un effet de médiateur entre certaines variables et les intentions d'usage. Nous l'avons mentionné avant, elle peut opérer conjointement avec la facilité d'utilisation perçue sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle ou sur d'autres variables que nous n'avons pas nécessairement incluses dans notre modèle, telles que le plaisir perçu ou le flow (Weibel, Wissmath, Habegger, Steiner, & Groner, 2008).

Pour finir, nous nous intéressons aux effets de la technophilie des utilisateurs sur leur acceptabilité de la réalité virtuelle. Celle-ci a un effet significatif sur l'utilité perçue – ce qui valide l'hypothèse 8b. Ce résultat signifie que les utilisateurs qui sont intéressés et attirés par les technologies trouvent la réalité virtuelle utile. Néanmoins, la technophilie n'a pas d'effets significatifs sur la facilité d'utilisation perçue et les intentions d'usage. Les hypothèses 8a et 8c ne sont donc pas validées. Ces résultats suggèrent que la perception de la facilité d'utilisation de la réalité virtuelle et l'intention de l'utiliser par la suite ne dépend pas de l'attrait des utilisateurs pour les technologies en général. L'effet de la technophilie sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle est indirect, il opère par le biais de l'utilité perçue : les utilisateurs technophiles perçoivent la réalité virtuelle comme utile et c'est cette perception qui prédit leur intention de l'utiliser par la suite.

Les résultats de notre étude apportent un éclairage sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans des situations de formation. Toutefois, certaines limites sont à

relever et ouvrent des perspectives de recherche. La première limite à relever, certainement majeure dans notre étude, concerne notre population. Elle était composée d'étudiants, dont les caractéristiques (âge, expérience avec les technologies, connaissances antérieures sur l'assemblage aéronautique, etc.) peuvent être très différentes des utilisateurs finaux de cet environnement virtuel, qui sont monteurs-ajusteurs dans l'aéronautique. Il serait donc critiquable de généraliser les perceptions des étudiants que nous avons recueillies à celles des monteurs-ajusteurs. De futures études devraient donc étudier les perceptions de ces derniers sur la réalité virtuelle.

De plus, ces études devraient être conduites en situation réelle de formation. En effet, une étude en situation réelle permettrait de pallier certaines limites de l'expérimentation : les perceptions des utilisateurs seraient alors inscrites dans un contexte social défini, avec son organisation et ses enjeux. Par ailleurs, ce type d'étude permettrait de s'intéresser à l'intégration de la réalité virtuelle aux activités de travail des formateurs et des apprenants. L'étude actuelle s'est arrêtée aux intentions d'usage dans le processus d'acceptation des technologies. Or, nous savons qu'il existe un écart entre intentions d'usage et usage effectif d'une technologie (Turner et al., 2010). Une approche plus située (Bobillier Chaumon, 2016; Bobillier Chaumon, 2013) interrogerait notamment les apports de la technologie, ses limites ainsi que ce qu'elle oblige à faire différemment ou ce qu'elle empêche de faire.

Une autre limite de notre étude concerne le recueil des perceptions des utilisateurs par questionnaires. Bien qu'ils permettent de faire des liens statistiques entre certaines variables, les réponses à ces questionnaires ne permettent pas de comprendre finement les raisons qui expliquent que les étudiants pensent de la réalité virtuelle qu'elle est utile en formation, par exemple. Des entretiens devraient être conduits dans de futures études afin d'interroger plus finement les participants sur ces questions.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE 5

L'objectif de cette étude était de tester un **modèle d'acceptabilité** de la réalité virtuelle dans un contexte de **formation à l'assemblage aéronautique**. Ce modèle vise à prédire les intentions d'usage de la réalité virtuelle dans ce contexte. Pour ce faire, il combine des variables issues du **TAM** (utilité perçue, facilité d'utilisation), des variables issues du modèle de **l'expérience utilisateur** d'Hassenzahl (2003, 2008) (qualité pragmatique, qualité hédonique stimulation et qualité hédonique identification), des **dimensions spécifiques à la réalité virtuelle** (présence et mal des environnements virtuels) et une variable relative aux **caractéristiques des utilisateurs** (technophilie).

Ce modèle a été testé auprès de **89 participants**, à qui nous demandions de réaliser une tâche d'assemblage aéronautique en réalité virtuelle.

Nos résultats suggèrent que **l'utilité perçue** a une influence **positive** sur les **intentions d'usage**, alors que le **mal des environnements** virtuels a une influence **négative** sur ces intentions.

L'utilité perçue est déterminée par la **qualité hédonique stimulation** et par la **technophilie**.

La **facilité d'utilisation perçue**, qui est déterminée par la **qualité pragmatique**, n'a **pas d'effet significatif** sur les **intentions d'usage**.

Cette expérimentation clôt la partie de notre thèse consacrée à nos études. Dans la prochaine partie, nous proposons une discussion des résultats obtenus dans

l'ensemble des études. Nous expliquerons également les questionnements qu'ouvrent nos travaux, mais aussi les limites de notre travail de recherche.

PARTIE IV. DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette thèse visait à identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique. Pour répondre à cet objectif, cinq études ont été menées. Trois portaient sur l'acceptation de la réalité virtuelle (Études 1, 2 et 4) et deux portaient sur son acceptabilité (Études 3 et 5).

Les quatre premières études ont été menées en situation de travail réel auprès d'utilisateurs (Études 1, 2 et 4) et de non-utilisateurs (Étude 3) de la réalité virtuelle. L'utilisation de la réalité virtuelle concernait dans ces études la conception de postes de fabrication ou d'outillages. La cinquième étude portait sur la formation à l'assemblage aéronautique. Elle a pris la forme d'une expérimentation sur les perceptions de potentiels futurs utilisateurs, qui étaient des étudiants. Cette discussion se centrera principalement sur les résultats obtenus lors des études en situations réelles, qui constituent le cœur de notre travail de thèse.

Deux versants de l'acceptabilité de la réalité virtuelle ont été étudiés : d'une part, les perceptions des utilisateurs à son égard, et, d'autre part, leur utilisation réelle de cette technologie (lorsque les études portaient sur son acceptation).

Nous reviendrons d'abord sur les principaux apports de cette thèse d'un point de vue théorique et méthodologique. Puis, nous nous arrêtons sur des questionnements que la conduite de cette recherche a ouverts. Nous présenterons ensuite les implications pratiques de nos résultats. Nous discuterons également des limites de nos études et des perspectives de recherche qui émergent de ce travail de recherche. Enfin, nous partagerons nos réflexions sur notre les apports de l'ergonomie dans l'étude de l'acceptabilité des technologies.

1. APPORTS THÉORIQUES

1.1. Perceptions des utilisateurs et des non-utilisateurs sur la réalité virtuelle : rôle central de l'utilité perçue

Les résultats obtenus dans nos études suggèrent un rôle central de l'utilité perçue dans l'acceptation et dans l'acceptabilité de la réalité virtuelle. En effet, dans les études menées dans des projets de conception de postes en industrie (Études 1 et 2), les utilisateurs soulignent l'utilité de la réalité virtuelle pour répondre à certains besoins dans la revue de projet. Selon eux, elle permet de comprendre les postes, de les évaluer, de proposer des solutions de conception en réponse aux problèmes identifiés, et de prendre des décisions de conception. Ils pointent également des bénéfices de la réalité virtuelle sur les outils déjà utilisés (principalement sur les logiciels de CAO, mais aussi sur les plans 2D). Ils jugent la réalité virtuelle plus immersive, et ils pensent qu'elle permet de détecter davantage de problèmes de conception, et donc qu'elle permet des gains de temps dans les projets et des gains financiers. L'utilité de la réalité virtuelle dans les revues de projet et ses bénéfices sur la CAO sont également relevés par les chargés de réalité virtuelle (Étude 4). Par ailleurs, alors que l'étude 3 se situait en phase d'acceptabilité de la réalité virtuelle, les non-utilisateurs pointent ces mêmes besoins et ces mêmes avantages sur la CAO. Les résultats de ces études permettent

alors de comprendre pour quelles raisons les utilisateurs jugent que la réalité virtuelle est utile dans leur travail.

Nous mettons également en évidence que certaines caractéristiques des projets (leur coût, leur ampleur et leur nouveauté) motivent les utilisateurs à adopter la réalité virtuelle. Là aussi, ces résultats renseignent sur l'utilité perçue de cette technologie : il semble que les individus procèdent à une analyse en coûts et bénéfices de son usage et décident d'y avoir recours seulement si les avantages qu'ils perçoivent (son utilité) compensent ses coûts (financiers, mais aussi le temps investi par les individus pour préparer les maquettes et participer aux sessions).

Les résultats obtenus lors de l'expérimentation sur la formation à l'assemblage aéronautique (Étude 4) suggèrent également un rôle central de l'utilité perçue, puisqu'elle est la seule variable, avec le mal des simulateurs, qui influence directement les intentions d'usage. Néanmoins – nous y reviendrons – ces résultats méritent d'être complétés par des résultats issus d'études qualitatives en situation réelle de formation.

L'ensemble de ces résultats est en accord avec les études qui identifient l'utilité perçue comme une variable centrale dans la prédiction des intentions d'usage des technologies (Davis et al., 1989; Legris et al., 2003; Yousafzai et al., 2007a). Ce rôle de l'utilité perçue a également été montré pour les environnements virtuels (e.g., Bertrand & Bouchard, 2008; Fetscherin & Lattemann, 2008; Tokel & Isler, 2013). Toutefois à la différence de ces études, nous avons pu identifier sur quels aspects les utilisateurs jugeaient la réalité virtuelle utile. Les résultats obtenus s'accordent avec ceux d'autres études empiriques sur l'utilisation de la réalité virtuelle dans des revues de projet en industrie, où la réalité virtuelle est jugée utile par les utilisateurs, car elle leur permet de comprendre un produit, de détecter des problèmes de conception et de prendre des décisions (Benne, 2013; Berg & Vance, 2017a; Liu et al., 2014; Wolfartsberger, 2019).

1.2. Utilisation réelle de la réalité virtuelle dans des revues de projet : l'environnement virtuel comme un objet intermédiaire de conception

Le deuxième apport théorique de notre travail concerne le rôle de l'environnement virtuel dans les revues de projet. Nous montrons qu'il est utilisé comme un objet intermédiaire de conception (Jeantet, 1998; Vinck, 2009). Dans le sens où il a plusieurs fonctions (Barcellini, 2015). Il sert de représentation du futur poste, sur laquelle s'appuient les concepteurs pour expliquer aux compagnons le processus de fabrication. Il est également utilisé comme support de collaboration entre l'ensemble des utilisateurs (préparateurs, compagnons, outilleurs...), puisque les participants aux sessions évaluent le poste, proposent des solutions de conception et prennent des décisions.

De plus, nous pensons que l'environnement virtuel donne du pouvoir aux compagnons dans les revues de conception. En effet, les sessions en réalité virtuelle leur permettent de prendre un rôle d'évaluateurs des décisions de conception, voire de co-concepteurs du poste aux côtés des préparateurs et des outilleurs au lieu d'être considérés comme de « simples » futurs utilisateurs des postes (Cahour, 2002).

1.3. Importance relative des perceptions des utilisateurs sur les caractéristiques de la réalité virtuelle

Nos résultats questionnent l'importance des perceptions des utilisateurs sur certaines caractéristiques de la réalité virtuelle. Ils évoquent positivement le sentiment de présence ressenti lors de l'interaction et la facilité d'utilisation du visio-casque. À l'inverse, ils critiquent le manque d'utilisabilité du CAVE et ils rapportent des symptômes de mal des environnements virtuels lors de son utilisation. Toutefois, ces perceptions sur les caractéristiques de la réalité virtuelle semblent avoir peu de poids face à l'utilité perçue dans la construction de leurs intentions d'usage. Par exemple, un compagnon rapporte des symptômes de mal des environnements virtuels et des difficultés dans la manipulation de la manette du CAVE, mais il considère qu'elle est utile dans les revues de projet et il souhaiterait à nouveau participer à des sessions en réalité virtuelle. À l'inverse, une non-utilisatrice souligne le réalisme de la réalité virtuelle et le plaisir ressenti lors de son interaction, mais elle choisirait de ne pas l'utiliser, car elle considère qu'elle n'est pas utile dans son travail.

Il semble ici que les utilisateurs accordent davantage d'importance à l'utilité de la réalité virtuelle qu'à ses caractéristiques fonctionnelles. Ce sont donc les apports réels de la réalité virtuelle pour les activités des personnes interrogées qui déterminent leur décision de l'utiliser ou non. La réalité virtuelle, même si elle est jugée facile d'utilisation et plaisante, est écartée si elle ne répond pas aux objectifs des utilisateurs. À l'inverse, son manque d'utilisabilité importe peu si les individus envisagent des bénéfices à son utilisation, comme un gain de pouvoir dans les décisions sur un poste, et plus largement, sur les tâches qu'ils auront à réaliser.

1.4. Une acceptation dépendante de l'intégration des sessions ainsi que des dispositifs et des logiciels utilisés

Nos résultats suggèrent que des variables comme l'avancement des projets, ainsi que les dispositifs et les logiciels utilisés ont des effets sur l'acceptation de la réalité virtuelle.

Pour commencer, dans nos études, l'acceptation de la réalité virtuelle dépend de la manière dont elle est intégrée aux projets de conception. Les utilisateurs soulignent davantage son intérêt dans les phases amont des projets. Par exemple, lors de notre première étude, les sessions intervenaient tardivement dans la conduite du projet, les principaux éléments du poste et le process ayant d'ores et déjà été définis. Pour cette raison, les compagnons, et notamment le compagnon 2, jugeaient la réalité virtuelle peu utile : ils souhaitaient que les sessions aient lieu plus en amont afin d'avoir des marges de manœuvre plus importantes pour apporter des modifications au poste. Les compagnons avaient d'ailleurs occupé un rôle de simples futurs utilisateurs lors de cette étude, et parfois d'évaluateurs, mais sans que les problèmes qu'ils pointaient ne soient toujours pris en compte. À l'inverse, la seconde session de l'étude 2 illustre une intégration de la réalité virtuelle plus en amont dans le projet : les compagnons ont occupé une place de co-concepteurs aux côtés du chargé d'affaires et des outilleurs et des modifications majeures ont été apportées sur le poste (avec un gain financier important souligné en entretien par le chargé d'affaires).

Par ailleurs, bien que nous ayons observé l'utilisation de la réalité virtuelle dans des situations analogues, c'est-à-dire pour des revues de projets, nous pensons que certaines différences entre les dispositifs, mais également entre les logiciels utilisés, peuvent affecter l'acceptation de la réalité dans les projets de conception. En premier

lieu, les utilisateurs qui ont utilisé le CAVE et le visio-casque (c'est-à-dire les chargés de réalité virtuelle, le préparateur A et le chargé d'affaires) leur attribuent des utilisations différentes ; le CAVE serait à privilégier pour une utilisation collective et pour la présentation d'un élément « terminé » (ce qui est le cas aujourd'hui), alors que le visio-casque leur semble pertinent pour une utilisation individuelle, notamment pour évaluer des outillages en cours de conception.

De plus, l'interaction avec le CAVE et avec le visio-casque varie. Par exemple, le partage de l'environnement virtuel est différent. Dans le CAVE, l'ensemble des utilisateurs est immergé, alors qu'avec le visio-casque, seul l'utilisateur qui porte le dispositif est immergé (ce qu'il visualise est toutefois projeté sur un écran déporté, non stéréoscopique). Par ailleurs, les dispositifs de commande sont différents, et les commandes également, puisque deux logiciels différents sont utilisés (RHEA pour le CAVE et SkyReal pour le visio-casque). Il faut également noter des différences dans l'utilisabilité de ces deux logiciels : le manque d'utilisabilité du logiciel RHEA est pointé par les utilisateurs de l'étude 2 et il est fortement critiqué par le chargé de réalité virtuelle 1, alors que le logiciel SkyReal est considéré comme facile d'utilisation.

Ces nuances entre l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets, entre les dispositifs et entre les logiciels utilisés sont à prendre en compte si l'on veut traiter plus finement de l'acceptation de la réalité virtuelle.

Notons également que l'étude 5 porte sur un cas d'usage différent, puisque la réalité virtuelle est utilisée à des fins de formation. Des spécificités de ce contexte pourraient également avoir un impact sur l'acceptation de la technologie. Par exemple, alors que la réalité virtuelle est jugée utile dans les projets de conception pour répondre à certains besoins des utilisateurs, *a fortiori* en phase amont des projets, il est possible que certaines caractéristiques des formations et que la manière dont la réalité virtuelle est intégrée aient un effet sur son utilité perçue et sur les intentions d'usage des apprenants et des formateurs.

1.5. Intérêt de l'étude du non-usage de la réalité virtuelle

Un autre apport théorique de notre thèse concerne l'étude du non-usage de la réalité virtuelle (Étude 3). Rappelons d'abord que, contrairement à l'acceptabilité des technologies, la non-utilisation et le rejet technologique sont peu traités dans la littérature (Boudokhane, 2006; Kellner et al., 2010; Laumer & Eckhardt, 2012). Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier des freins à l'utilisation de la réalité virtuelle qui n'avaient pas été pointés dans les études précédentes.

Les entretiens que nous avons menés nous ont permis d'identifier deux formes de non-usage de la réalité virtuelle parmi les préparateurs et les outilleurs interrogés. Une première catégorie d'individus jugent que la réalité virtuelle est inutile dans leur travail ; nous expliquerons le non-usage pour ces individus par un *manque d'intérêt* (Satchell & Dourish, 2009). Une seconde catégorie d'individus n'utilisent pas la réalité virtuelle, mais pensent qu'elle serait utile dans leurs projets, ce qui suggère une *adoption tardive* de la réalité virtuelle (Satchell & Dourish, 2009), plutôt qu'un rejet.

Nous avons constaté lors de cette étude que les personnes interrogées ne savaient pas toujours que l'entreprise était équipée de technologies de réalité virtuelle. De même, lorsqu'elles connaissaient les équipements, elles avaient peu de connaissance sur les projets menés avec la réalité virtuelle, ainsi que sur ses apports et ses limites dans ces projets. Ce constat explique en partie le jugement d'inutilité porté sur la réalité virtuelle par une partie des non-utilisateurs. En effet, Venkatesh et

Davis (2000) ont identifié la visibilité des résultats d'une technologie et la qualité de ces résultats comme des déterminants de l'utilité perçue. Par ailleurs, ces mêmes auteurs montrent que l'utilité perçue d'une technologie est également déterminée par son adéquation avec le travail des individus, ce qui explique également le manque d'utilité pour cette catégorie de non-utilisateurs. Pourtant, les chargés de réalité virtuelle rapportent des actions de communications autour de la réalité virtuelle et de son utilisation dans les revues de projet ; il semble qu'elles n'ont pas touché l'ensemble des individus concernés.

Toutefois, il est prévu que la réalité virtuelle soit mise à disposition de l'ensemble des outilleurs. Son implantation nous permettra, d'une part, de déterminer si la première catégories d'individus la rejettera effectivement et, d'autre part, d'affirmer que les individus de la seconde catégorie étaient en réalité de *futurs* utilisateurs.

1.6. Questionnement des frontières entre les concepts d'acceptabilité pratique, d'acceptabilité sociale et d'acceptation située

L'ensemble des apports théoriques que nous venons de décrire ouvre par ailleurs un questionnement sur les frontières entre les différentes formes d'acceptabilité que nous décrivions dans notre partie théorique (Partie I. Chapitre 3, p. 52).

Dans nos études, nous mettons en évidence des influences réciproques entre l'interaction avec la technologie, les perceptions des utilisateurs et l'intégration de la technologie à leurs activités. Les difficultés des utilisateurs dans l'utilisation du CAVE en sont une illustration. En effet, alors qu'elles renvoient initialement à un manque d'utilisabilité de la technologie, et donc à son acceptabilité pratique, nous montrons que le manque d'utilisabilité du CAVE fait également partie des perceptions des utilisateurs (acceptabilité sociale) et qu'il a des effets sur le déroulement de la revue de projet (acceptation située). Nous pensons alors que les frontières entre les concepts d'acceptabilité pratique, d'acceptabilité sociale et d'acceptation située méritent d'être questionnées, puisque la complexité des situations d'utilisation (et notamment les influences mutuelles entre interaction, perceptions et activité) rend les frontières entre ces notions difficiles à tracer. Par conséquent, il est difficile de cloisonner à l'une ou l'autre de ces formes d'acceptabilité les facteurs d'acceptation et de rejet identifiés.

Par ailleurs, alors que les apports de l'acceptabilité pratique et de l'acceptabilité sociale sont considérés comme pertinents en phase d'acceptabilité de la réalité virtuelle (Bobillier Chaumon, 2013, 2016), nos résultats montrent que, même dans des études situées en phase d'acceptation de la réalité virtuelle, l'interaction utilisateur-technologie et les perceptions des utilisateurs sont à prendre en compte. L'interaction avec la technologie est d'ailleurs intégrée, par l'intermédiaire des coûts cognitifs et émotionnels qu'elle représente, dans les dimensions individuelles de l'acceptation située (Bobillier Chaumon, 2013, 2016).

1.7. Questionnement sur l'identification des facteurs d'acceptation et de facteurs de rejet d'une technologie

L'analyse de nos résultats nous amène également à questionner l'identification des facteurs d'acceptation et de rejet d'une technologie. En effet, comme nous l'avons parfois souligné dans la présentation de nos résultats, il a été difficile de déterminer si les perceptions positives des utilisateurs constituaient des facteurs d'acceptation, ou si leurs perceptions négatives constituaient des facteurs de rejet. Pour cette raison,

nous avons alors choisi de définir comme facteurs d'acceptation ou de rejet les éléments pour lesquels les utilisateurs faisaient des liens directs avec leur décision d'utiliser. Par exemple, nous avons défini l'utilité perçue de la réalité virtuelle comme un facteur d'acceptation, car les utilisateurs soulignaient que c'était l'utilité de la réalité virtuelle qui déterminait la décision d'intégrer la réalité virtuelle à nouveau dans un projet (préparateur 1 de l'étude 1 ; chargé d'affaires de l'étude 2) ou de participer aux sessions (compagnons des études 1 et 2). C'est l'intérêt dans l'activité des utilisateurs qui semblent déterminer l'adoption ou le rejet de la réalité virtuelle. Toutefois, comme nous l'expliquions précédemment, les situations d'interaction sont complexes et entrecroisent des facteurs relatifs à l'interaction, aux perceptions des utilisateurs et à l'activité de conception. Nous pensons que les facteurs que nous n'avons pas effectivement défini comme des facteurs d'acceptation ou de rejet peuvent bien entendu modérer les facteurs identifiés. Par exemple, l'utilisabilité des technologies, qui ne constitue pas nécessairement un facteur d'acceptation, peut améliorer l'utilité et les bénéfices perçus de la réalité virtuelle en permettant aux utilisateurs d'utiliser d'autres fonctionnalités et d'être plus efficaces lors des sessions.

1.8. Questionnement sur les nuances de l'utilisation effective dans des sessions collectives avec la réalité virtuelle

Enfin, les études 1 et 2 questionnent les nuances de l'utilisation effective d'une technologie lorsqu'elle est utilisée collectivement. En effet, nous avons défini dans ce travail de recherche qu'une technologie acceptée est une technologie sur laquelle les utilisateurs ont des perceptions positives et qu'ils ont l'intention d'utiliser, mais également une technologie qui est *effectivement* utilisée.

Toutefois, les études 1 et 2 nous amènent à identifier des formes différentes d'utilisation. Arrêtons-nous sur les deux responsables de projet, le préparateur 1 pour l'étude 1 et le chargé d'affaires pour l'étude 2. Le premier a assisté aux deux sessions du projet, s'est tenu dans le CAVE, mais n'a pas utilisé la manette. Le second a lui aussi assisté aux deux sessions du projet, mais il n'est pas du tout entré dans le CAVE et il n'a pas porté le visio-casque. Pourtant pour ces deux personnes, la réalité virtuelle est un outil qu'ils ont *décidé* d'utiliser et ils rapportent à la fois des perceptions très positives sur son intégration dans leurs projets, mais aussi des intentions d'usage pour de futurs projets.

Ces résultats suggèrent que même si des utilisateurs n'utilisent pas effectivement des technologies – dans le cas de la réalité virtuelle, en pilotant l'environnement virtuel – ils peuvent malgré tout adopter ces technologies. Un phénomène similaire est pointé dans l'article de Satchell et Dourish (2009) sur les non-utilisateurs. Ces auteurs décrivent des situations de *déplacement*, où des personnes n'utilisent certaines technologies que par l'intermédiaire d'autres personnes. Ils expliquent que dans ces situations, les non-utilisateurs tirent les mêmes bénéfices de l'utilisation d'une technologie que les utilisateurs.

Ces résultats sur les nuances de l'utilisation effective interrogent également à la fois sur les raisons qui expliquent que ces personnes décident d'intégrer la réalité virtuelle à leurs projets, sans qu'elles ne l'utilisent effectivement, mais également sur les raisons qui expliquent qu'elles n'utilisent pas les dispositifs de commande lors des sessions.

2. APPORTS MÉTHODOLOGIQUES

Des apports méthodologiques peuvent également être tirés de ce travail de thèse. Nous avons proposé d'étudier l'acceptation de la réalité virtuelle en combinant l'étude des perceptions des utilisateurs et l'étude de leur utilisation réelle de la technologie. Nous pensons que les méthodes mobilisées dans ce travail de thèse sont pertinentes pour étudier l'acceptation des technologies.

2.1. Intérêt des entretiens pour étudier l'acceptabilité et l'acceptation des technologies

En premier lieu, nous pensons qu'il est pertinent d'adopter des approches qualitatives lorsque l'on s'intéresse à l'acceptabilité des technologies. D'autres études ont également adopté des approches similaires, en procédant à des entretiens avec les utilisateurs (e.g., Peng, Kanthawala, Yuan, & Hussain, 2016) et en combinant entretiens et observations (Bobillier Chaumon et al., 2013). Cependant, à notre connaissance, le recueil des perceptions des utilisateurs par questionnaire reste la méthode la plus couramment utilisée.

Nous pensons que les données recueillies lors des entretiens sont plus riches que celles que permettraient les échelles de mesure existantes, comme celles du TAM (Davis, 1989) ou de l'UTAUT (Venkatesh et al., 2003). Par exemple, nous avons constaté que les utilisateurs jugent la réalité virtuelle utile, à la fois parce qu'elle répond à des besoins (par exemple, de prendre connaissance du poste, de l'évaluer, de prendre des décisions) et parce qu'elle présente des bénéfices sur la CAO (par exemple, elle permet de détecter davantage de problèmes). L'utilisation de questionnaires, avec des items comme « *Je trouve que la réalité virtuelle est utile* » (Davis, 1989), nous aurait permis de déterminer le degré avec lequel les utilisateurs jugent la réalité virtuelle utile, sans comprendre les besoins auxquels elle répond. De la même manière, des items comme « *Je trouve que la réalité virtuelle améliorerait mon efficacité* » (Davis, 1989) pourraient renseigner sur les avantages de la réalité virtuelle, sans indiquer qu'ils concernent la comparaison de la réalité virtuelle aux logiciels de CAO et sur quels aspects les utilisateurs considèrent qu'elle est meilleure. L'étude des intentions d'usage aurait présenté les mêmes limites : nous aurions obtenu des résultats généraux sur les intentions d'usage de la réalité virtuelle ; nous n'aurions pas constaté que les utilisateurs prennent en compte certaines caractéristiques des projets pour juger de l'utilité de la réalité virtuelle ou pour décider de l'utiliser ou non.

2.2. Intérêt des observations de situations réelles d'utilisation pour étudier l'acceptation des technologies

Nous pensons également que les observations menées ont été pertinentes pour étudier l'acceptation de la réalité virtuelle, et ce, pour trois raisons. D'abord, elles ont facilité la conduite des entretiens, puisqu'elles nous ont permis de comprendre les postes conçus, auxquels les personnes interrogées faisaient référence lors des entretiens, mais également de revenir sur des moments précis de l'utilisation.

Ensuite, ces observations nous ont permis de caractériser l'utilisation de la réalité virtuelle lors des revues de projet, en identifiant les principaux utilisateurs des dispositifs de commande, les fonctionnalités qu'ils utilisent et les communications entre les différents participants aux sessions. Sur la base de nos observations, nous avons également pu décrire le déroulement des revues de projet, mais aussi comprendre les

rôles des participants, notamment ceux du chargé de réalité virtuelle dans le CAVE (Étude 1), des préparateurs (Études 1 et 2) et des compagnons (Études 1 et 2).

Enfin, en analysant les sessions en réalité virtuelle, nous avons mis en évidence des dysfonctionnements des technologies et des difficultés de manipulation pour les utilisateurs. Certains étaient mentionnés en entretien, les données d'observations permettant dans ce cas une triangulation des données (Gibson, 2016). Par ailleurs, certains dysfonctionnements et certaines difficultés n'avaient pas été évoqués en entretien, mais étaient gênants dans la conduite de la revue de projet – nous pouvons d'ailleurs en tirer des recommandations, ce que nous présenterons dans les implications pratiques de notre travail de thèse.

Nous pensons que, de manière générale, l'observation des situations d'utilisation réelle est pertinente dans l'étude de l'acceptation des technologies. Comme nous venons de le montrer pour notre travail de recherche, les observations menées peuvent informer les chercheurs sur les contextes d'utilisation, sur l'expérience réelle des utilisateurs avec la technologie, mais aussi sur des aspects objectifs des interactions qui peuvent poser problème.

L'accès difficile aux populations de notre terrain d'étude nous a obligée à observer uniquement l'utilisation de la réalité virtuelle. C'est évidemment une limite de notre travail sur laquelle nous reviendrons à la fin de cette discussion. Toutefois, nous pensons que l'analyse de l'activité des utilisateurs, avec et sans la technologie, peut nous renseigner sur la façon dont « le produit, ou système technique, s'insère dans la chaîne instrumentale existante et dans les activités de l'utilisateur, et comment il contribue à transformer ces activités » (Barcenilla & Bastien, 2009, p. 311). Les études de terrain en ergonomie et en psychologie du travail sur les incidences des technologies sur le travail des individus témoignent de la pertinence des études de terrain pour étudier l'acceptation d'une technologie, même si ce n'est pas nécessairement l'objectif qu'elles visent. Par exemple, Valléry et Leduc (2016) ont réalisé une étude auprès de gendarmes, par le biais d'entretiens et d'observations du travail, et montrent des effets des technologies de l'information et de la communication (GSM, messagerie, intranet...) sur les pratiques d'encadrement, les gendarmes privilégiant selon le type de messages certains canaux (par exemple, à l'oral ou à l'écrit), ou les encadrants se rendant plus accessibles à leurs subordonnés. De la même manière, Pavageau, Nascimento, et Falzon (2007) ont conduit une étude de terrain sur les effets de l'introduction de l'informatique pour des agents du ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. En combinant des entretiens, des observations de leur travail et une analyse par questionnaire, ils montrent que la majorité des gens a une opinion positive sur l'introduction de l'informatique, bien qu'elle ait posé des difficultés au moment de la transition. Ils rapportent un enrichissement des tâches et un développement des compétences, mais également une surcharge attentionnelle et un manque d'utilisabilité des outils.

2.3. Grille d'analyse de l'utilisation de deux dispositifs de réalité virtuelle lors de revues de conception

Nous avons contribué à développer un outil d'analyse de l'utilisation de la réalité virtuelle dans des revues de conception, outil qui peut être adapté et réutilisé dans d'autres études. Nous avons construit une grille d'observation de l'utilisation de deux dispositifs de réalité virtuelle (un CAVE et un visio-casque), qui fonctionnent avec des logiciels différents (RHEA pour le CAVE et SkyReal) pour le visio-casque. Cette grille

permet de décrire de manière systématique le partage des technologies entre les utilisateurs (par exemple, tenir la manette ou porter des lunettes), les fonctionnalités utilisées (par exemple, se déplacer dans l'environnement virtuel et saisir des objets) et les comportements des utilisateurs dans le monde physique (par exemple, sortir du CAVE ou s'asseoir sur une chaise).

Cette grille peut être adaptée de plusieurs manières. D'abord, il est possible d'en modifier le contenu pour l'adapter à des logiciels qui proposeraient des fonctionnalités différentes, ou encore pour intégrer des comportements des utilisateurs que nous n'avons pas observés. Ensuite, elle peut être utilisée pour des applications différentes, qui exploiteraient les mêmes logiciels, par exemple, pour de l'assemblage virtuel ou des simulations d'opérations (même si ces situations peuvent également nécessiter de modifier le contenu de la grille). Enfin, elle peut être utilisée lors de comparaisons systématiques, par exemple pour des chercheurs dont l'objectif serait de comparer des revues de projet co-localisées et à distance, ou encore qui chercheraient à étudier l'effet d'un logiciel sur le déroulement des revues de projet.

2.4. Grille d'analyse des communications lors des revues de projet avec réalité virtuelle

Notre travail a également consisté en la construction d'une grille d'analyse des communications lors des revues de projet. D'autres méthodes existent pour étudier ce type d'activités en s'appuyant sur l'analyse de protocoles verbaux. Nous nous sommes particulièrement intéressée aux méthodes développées pour analyser les activités de conception collective (e.g., Darses, Détienne, Falzon, & Visser, 2001; Gero & Mc Neill, 1998; Olson, Olson, Carter, & Storosten, 1992; Stempfle & Badke-Schaub, 2002). Cependant, les schèmes de codage que nous avons répertoriés nous semblaient être peu adaptés à notre objectif, qui était de décrire de manière globale l'activité de conception des participants lors des sessions en réalité virtuelle. En effet, ces outils proposent une analyse fine de l'activité cognitive des concepteurs, ce qui nécessite (1) soit de combiner un type d'actions de conception et un contenu (e.g., Darses et al., 2001); (2) soit de s'intéresser à différents niveaux d'abstraction (Gero & Mc Neill, 1998) ou à différents niveaux d'actions (Rahimian & Ibrahim, 2011; Suwa, Purcell, & Gero, 1998).

Pour cette raison, nous avons choisi de construire une grille *ad hoc*, plus adaptée aux situations observées et à notre objectif. Nous nous sommes tout de même appuyée sur des méthodes testées empiriquement. Nous nous sommes ainsi inspirée de la grille de Maher et al. (2000), qui a été développée pour des situations de conception par le biais d'un environnement virtuel non immersif et à distance, ainsi que des grilles de Darses et al. (2001), Olson (1992), ou encore de Stempfle et Badke-Schaub (2002), qui nous ont permis d'identifier des actions de conception générale (proposition de solution, évaluation, explications sur les futures tâches). Nous pensons que la grille d'analyse que nous avons développée est intéressante pour des chercheurs qui voudraient caractériser de manière large les communications entre les participants à une revue de projet en industrie, tout en prenant en compte les communications qui concernent le partage de l'environnement virtuel.

3. IMPLICATIONS PRATIQUES

Les résultats obtenus dans notre thèse ont également des implications pratiques, à la fois pour Stelia Aerospace et pour les industries qui chercheraient à rendre la réalité virtuelle plus acceptable dans les revues de projet.

3.1. Recommandations sur la conception des systèmes de réalité virtuelle

Nous pouvons émettre quelques recommandations sur la conception des systèmes de réalité virtuelle utilisés dans nos études et notamment sur leur utilisabilité. Les chargés de réalité virtuelle et les utilisateurs ont souligné le manque d'utilisabilité du CAVE, et surtout du logiciel RHEA. Deux principaux défauts ont été pointés. Pour les utilisateurs, la manette est difficile à utiliser, car elle requiert de pointer une direction, parfois en devant faire un angle important avec son poignet, pour pouvoir se déplacer. Les déplacements dans l'environnement virtuel avec la manette du visio-casque ont à l'inverse été jugés faciles ; les utilisateurs se servaient des flèches directionnelles de la manette pour se déplacer. Pour le chargé de réalité virtuelle, c'est surtout le guidage du logiciel RHEA qui pose problème. Il pointe par exemple le manque de clarté des pictogrammes qui désignent les fonctionnalités et le manque de feedback du logiciel pour indiquer une erreur ou un temps de chargement en cours. Ces deux aspects font partie des critères ergonomiques définis par Bach et Scapin (2005) afin de garantir l'utilisabilité d'un environnement virtuel. Nous avons également relevé d'autres difficultés, non évoquées dans ce travail de thèse, mais qui méritent d'être davantage investiguées et corrigées. Par exemple, les utilisateurs doivent passer par deux voire trois menus différents avant de pouvoir utiliser une fonctionnalité ; alors que les critères ergonomiques mentionnés auparavant recommandent de réduire le nombre d'étapes à réaliser pour pouvoir effectuer une action. L'intégration des outils dans les environnements virtuels ainsi que la possibilité de modifier l'environnement virtuel en temps réel pour évaluer des solutions sont également des besoins rapportés par les utilisateurs.

3.2. Recommandations sur l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets

Les utilisateurs ont par ailleurs exprimé des besoins relatifs à l'intégration de la réalité virtuelle dans les projets. D'abord, ils mettent en avant des éléments positifs des sessions conduites, à savoir la participation de différents métiers aux sessions, et surtout la participation des compagnons. Par conséquent, il semble important que les prochaines sessions conduites remplissent ces conditions. Par ailleurs, il semble nécessaire que la réalité virtuelle soit intégrée en amont des projets, d'abord parce que les utilisateurs soulignent qu'elle permet de détecter des problèmes et qu'elle permet des gains de temps et des gains financiers, mais aussi parce qu'elle est jugée inutile lorsqu'elle intervient trop tardivement. Son intégration en amont des projets permettrait également aux concepteurs d'avoir davantage de marges de manœuvre pour effectuer des modifications sur les postes (Midler, 1996).

De plus, les utilisateurs expriment le besoin d'avoir des informations sur le projet et d'être formés à l'utilisation des dispositifs de commande avant les sessions. Ils considèrent qu'en connaissant le poste et les futures tâches à effectuer et en sachant comment utiliser la réalité virtuelle, ils pourraient davantage se concentrer sur la revue de projet. Ces besoins renvoient à l'idée d'une charge cognitive importante des

utilisateurs en environnement virtuel immersif (van der Land et al., 2013), notamment parce qu'ils doivent s'orienter dans l'espace, comprendre l'organisation spatiale du poste, l'organisation spatiale et temporelle du process de fabrication, évaluer le poste et proposer des solutions de conception.

4. LIMITES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Pour finir, notre travail de thèse présente des limites dont nous pouvons tirer des perspectives de recherche. La première limite de notre travail concerne les entretiens que nous avons réalisés avec les utilisateurs, et plus globalement le processus d'acceptabilité tel que nous l'avons étudié. Nous n'avons pas d'informations sur les personnes qui allaient participer aux sessions en réalité virtuelle avant qu'elles n'aient lieu. Pour cette raison, comme nous l'avons expliqué dans les limites des études 1 et 2, nous n'avons pu interroger les participants des revues de projet qu'*après* les sessions en réalité virtuelle (à l'exception des préparateurs de la première étude et du chargé d'affaires de la seconde). Notre travail de thèse porte donc majoritairement sur l'*acceptation* de la réalité virtuelle, c'est-à-dire sur des situations où les individus utilisent cette technologie, plutôt que sur son *acceptabilité*. Par conséquent, nous n'avons pas d'informations sur les perceptions des utilisateurs avant les sessions en réalité virtuelle. Pour pallier cette limite, nous avons néanmoins conduit une étude auprès de non-utilisateurs, afin de recueillir les perceptions de potentiels utilisateurs en phase d'acceptabilité de la réalité virtuelle. Toutefois, il aurait été plus pertinent de conduire des études longitudinales sur ces projets de conception et d'étudier l'évolution des perceptions des utilisateurs suite à leur utilisation de la réalité virtuelle.

Par ailleurs, des études avant que les sessions en réalité virtuelle n'aient lieu auraient pu nous aider à mieux identifier les raisons qui ont motivé les responsables de projet à avoir recours à la réalité virtuelle. Nous avons abordé ces aspects dans les entretiens suite aux sessions, avec le risque que les utilisateurs aient rationalisé et reconstruit leurs motivations, pour qu'elles s'accordent à l'utilisation de la réalité virtuelle telle qu'ils l'ont expérimentée. De futures études devraient alors interroger le processus d'acceptabilité dans son ensemble, de la prise de décision des futurs utilisateurs à l'implantation des postes et au-delà, pour comprendre l'évolution des perceptions des utilisateurs. Ces études donneraient la possibilité de caractériser la rétroaction des usages (Brangier et al., 2009), c'est-à-dire de quelle manière l'utilisation de la réalité virtuelle influence les perceptions des utilisateurs sur ses qualités.

Le cadre restreint de nos études est également une limite qu'il nous faut pointer. En effet, nous avons choisi de conduire des études *in situ*, mais nous avons pu uniquement observer l'utilisation de la réalité virtuelle, lors des sessions organisées par les équipes de conception. Pourtant, comme nous l'évoquions précédemment dans cette discussion, une analyse de l'activité des concepteurs (préparateurs et chargé d'affaires) hors de ces sessions aurait permis de mieux comprendre les incidences de l'introduction de la réalité virtuelle dans les projets de conception. Nous aurions pu notamment comprendre ses effets sur leur activité, par exemple, sur la temporalité des projets conduits, sur leur collaboration avec d'autres services ou encore sur les tâches nécessaires à la préparation de ces sessions. Certains exemples nous ont d'ailleurs été donnés dans les entretiens. Les préparateurs de la première étude nous ont expliqué la nécessité de collaborer avec différents services pour formaliser des maquettes CAO à destination des sessions. Ils rapportent également,

comme le chargé d'affaires de la seconde étude, des décisions de conception prises pour leur projet respectif après les sessions.

Une autre limite à pointer est liée à la temporalité de nos études. En effet, nous avons expliqué dans la présentation des limites de nos études précédentes qu'en raison de changements dans les projets de conception, mais aussi faute de disponibilité des utilisateurs, plusieurs entretiens ont été conduits plusieurs mois après les sessions en réalité virtuelle. Nous avons donc étudié la manière dont les utilisateurs percevaient *au moment des entretiens* des éléments marquants de l'interaction avec la réalité virtuelle. Ces études restent pertinentes, puisque ce sont ces perceptions qui vont déterminer leurs intentions d'utiliser à nouveau, voire une future utilisation (en plus d'éléments contextuels que nous avons évoqués, comme les contraintes temporelles et les caractéristiques des projets). Toutefois, si les entretiens avaient été conduits peu de temps après les sessions, les utilisateurs auraient plus facilement pu revenir sur des éléments précis de l'interaction et sur des aspects renvoyant à l'acceptabilité pratique de la réalité virtuelle. Il serait également pertinent de procéder à des entretiens « re-situants », tels que proposés par Cahour et al. (2016) : la confrontation des utilisateurs aux vidéos capturées aurait pu nous renseigner sur certaines caractéristiques de l'interaction avec la réalité virtuelle (difficulté d'utilisation, erreurs de manipulation, mal des environnements virtuels...), et notamment sur des dimensions affectives et émotionnelles (sentiment de présence, frustration...) de l'interaction avec la réalité virtuelle.

Enfin, l'étude conduite sur l'acceptabilité de la réalité virtuelle pour la formation au montage aéronautique a eu lieu en conditions expérimentales et auprès d'étudiants. Elle devait initialement précéder une seconde étude qui devait consister en un suivi longitudinal d'apprenants et de formateurs en situation réelle de formation. Cette étude n'a pas pu avoir lieu. Elle nous aurait toutefois permis de confronter des résultats sur les perceptions d'étudiants obtenues par questionnaire à des résultats recueillis par entretiens sur les perceptions d'utilisateurs finaux en situation de formation. Le modèle d'acceptabilité testé lors de cette expérimentation aurait donc pu être confronté à des données issues d'études écologiques.

5. APPORTS DE L'ERGONOMIE À LA QUESTION DE L'ACCEPTABILITÉ DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE À DIFFÉRENTES PHASES DE SON IMPLANTATION

Nous proposons de clore ce manuscrit par une ouverture sur les apports de l'ergonomie à la question de l'acceptabilité de la réalité virtuelle à différentes phases de l'implantation. En effet, cette thèse concernait majoritairement des situations où les systèmes de réalité virtuelle des études étaient conçus, déjà implantés et où des cas d'usage spécifiques étaient envisagés. Dans ce cadre, notre travail a consisté à identifier des facteurs d'acceptation et de rejet de la réalité virtuelle pour un cas d'usage spécifique qui était la revue de projet.

Nous souhaitons toutefois souligner les apports de l'ergonomie sur la question de l'acceptabilité de la réalité virtuelle à différentes phases de son implantation. D'abord, les ergonomes peuvent intervenir dans la conception des systèmes pour proposer des recommandations et des critères sur différentes dimensions (utilisabilité, présence, mal des environnements virtuels...), mais aussi pour informer les concepteurs sur l'activité actuelle et pour conduire des évaluations avec les futurs utilisateurs (Burkhardt & Sperandio, 2004). Avant l'implantation des technologies, les

ergonomes peuvent identifier des freins et des leviers à l'implantation des technologies auprès de futurs utilisateurs, s'assurer de l'adéquation avec leurs activités, de la possibilité pour eux de se les approprier et ils peuvent participer à l'accompagnement du changement. Une fois les technologies implantées, il est également possible de mener des études sur leurs effets sur les travailleurs et sur leurs activités et de travailler avec eux à des pistes d'amélioration. Les différentes phases d'implantation de la réalité virtuelle mobilisent donc des compétences différentes des ergonomes.

BIBLIOGRAPHIE

- Abate, A. F., Guida, M., Leoncini, P., Nappi, M., & Ricciardi, S. (2009). A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry. *Journal of Visual Languages and Computing*, 20(5), 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2009.07.003>
- Agarwal, R., & Prasad, J. (1998). A Conceptual and Operational Definition of Personal Innovativeness in the Domain of Information Technology. *Information Systems Research*, 9(2), 204–215. <https://doi.org/10.1287/isre.9.2.204>
- Ajzen, I. (1991a). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50, 179–211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T)
- Ajzen, I. (1991b). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211. [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-t](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-t)
- Akrich, M. (1998). Les utilisateurs, acteurs de l'innovation. *Education Permanente*, 134, 79–89.
- American Psychological Association. (2019). Seventh Edition of APA's Best-Selling Publication Manual to Publish in October With a 700,000 First Printing. En ligne <https://www.apa.org/news/press/releases/2019/08/publication-manual>
- Amoako-Gyampah, K. (2007). Perceived usefulness, user involvement and behavioral intention: an empirical study of ERP implementation. *Computers in Human Behavior*, 23(3), 1232–1248. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2004.12.002>
- Apple. (2019). Human Interface Guidelines. En ligne <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/>
- Argelaguet, F., Kulik, A., Kunert, A., Andujar, C., & Froehlich, B. (2011). See-through techniques for referential awareness in collaborative virtual reality. *International Journal of Human Computer Studies*, 69(6), 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2011.01.003>
- Aromaa, S., & Väänänen, K. (2016). Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied Ergonomics*, 56, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.02.015>
- Atarodi, S., Berardi, A. M., & Toniolo, A.-M. (2019). Le modèle d'acceptation des technologies depuis 1986 : 30 ans de développement. *Psychologie Du Travail et Des Organisations*, 25(3), 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2018.08.001>
- Bach, C., & Scapin, D. L. (2005). *Critères Ergonomiques pour les Interactions Homme-Environnements Virtuels : justifications et exemples*. [Rapport de recherche] RR-5531. En ligne <https://hal.inria.fr/inria-00070476v2>
- Bach, C., Scapin, D. L., Voluceau, D. De, & Cedex, L. C. (2003). Adaptation of Ergonomic Criteria to Human-Virtual Environments Interactions. In *Proceedings of Interact 03* (pp. 880–883). En ligne <http://www-sop.inria.fr/orion/COGC/teams/MERLINShortINTERACT-Bach.pdf>
- Balog, A., & Pribeanu, C. (2010). The role of perceived enjoyment in the students' acceptance of an augmented reality teaching platform: a structural equation modelling approach. *Studies in Informatics and Control*, 19(3), 319–330. <https://doi.org/10.24846/v19i3y201011>

- Barcellini, F. (2015). *Développer des interventions capacitantes en conduite du changement* (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches). Université de Bordeaux. En ligne <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01150586>
- Barcenilla, J., & Bastien, J.-M.-C. (2009). L'acceptabilité des nouvelles technologies : quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur ? *Le Travail Humain*, 72(4), 311–331. <https://doi.org/10.3917/th.724.0311>
- Bargas-Avila, J., & Hornbæk, K. (2011). Old wine in new bottles or novel challenges: A critical analysis of empirical studies of user experience. *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'11)*, 2689–2698. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979336>
- Bastien, J. M. C. (2004). L'inspection ergonomique des logiciels interactifs : intérêts et limites. In J.-M. Hoc & F. Darses (Eds.), *Psychologie ergonomique : tendances actuelles* (pp. 49–70). Paris: Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.hocj.2004.01.0049>
- Becker, J. M., Klein, K., & Wetzels, M. (2012). Hierarchical Latent Variable Models in PLS-SEM: Guidelines for Using Reflective-Formative Type Models. *Long Range Planning*, 45(5–6), 359–394. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2012.10.001>
- Béguin, P. (2004). L'ergonome, acteur de la conception. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 375–390). Paris: Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0375>
- Benali-Koudja, M., & Hafez, M. (2006). Les interfaces tactiles. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Volume 2, pp. 219–240). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Bennes, L. (2013). *Vers une méthodologie de développement d'outils de réalité virtuelle pour faciliter la convergence métiers en conception de produits centrée sur l'homme* (Thèse de Doctorat). Université de Technologie Belfort-Montbéliard. En ligne <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00931376>
- Benoit, M., Guerchouche, R., Petit, P. D., Chapoulie, E., Manera, V., Chaurasia, G., ... Robert, P. (2015). Is it possible to use highly realistic virtual reality in the elderly? A feasibility study with image-based rendering. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 11, 557–563. <https://doi.org/10.2147/NDT.S73179>
- Berg, L. P., & Vance, J. M. (2017a). An Industry Case Study: Investigating Early Design Decision Making in Virtual Reality. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(1), 1–7. <https://doi.org/10.1115/1.4034267>
- Berg, L. P., & Vance, J. M. (2017b). Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey. *Virtual Reality*, 21(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0293-9>
- Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2019). Virtual reality simulation and ergonomics assessment in aviation maintainability. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 822, 141–154. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15
- Bertrand, M., & Bouchard, S. (2008). Applying the technology acceptance model to vr with people who are favorable to its use. *Journal of Cyber Therapy and Rehabilitation*, 1(2), 200–210.
- Bhattacharjee, A. (2001). Understanding Information Systems Continuance: An

- Expectation-Confirmation Model. *MIS Quarterly*, 25(3), 351–370. <https://doi.org/10.2307/3250921>
- Biocca, F. (1997). The cyborg's dilemma: embodiment in virtual environments. In *Proceedings Second International Conference on Cognitive Technology Humanizing the Information Age*. Aizu-Wakamatsu City, Japan. <https://doi.org/10.1109/CT.1997.617676>
- Biocca, Frank. (1992). Will Simulation Sickness Slow Down the Diffusion of Virtual Environment Technology? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(3), 334–343. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.3.334>
- Biocca, Frank, Kim, J., & Choi, Y. (2001). Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 247–265. <https://doi.org/10.1162/105474601300343595>
- Blythe, M., & Monk, A. (2018). *Funology 2* (2e éd). Cham, Suisse: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68213-6>
- Bobillier Chaumon, M.-E. (2013). *Conditions d'usage et facteurs d'acceptation des technologies dans l'activité : questions et perspectives pour la psychologie du travail* (Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches). Université de Grenoble 2. En ligne http://greps.univ-lyon2.fr/medias/fichier/hdr-bobillier-%0Anov2013_1417698910465-pdf
- Bobillier Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie Du Travail et Des Organisations*, 22(1), 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>
- Bobillier Chaumon, M.-E., & Clot, Y. (2016). Clinique de l'usage : Les artefacts technologiques comme développement de l'activité. *Activites*, 13(2), 0–7. <https://doi.org/10.4000/activites.2897>
- Bobillier Chaumon, M.-E., Cuvillier, B., Durif-Bruckert, C., Cros, F., Vanhille, M., & Bekkadj, S. (2014). Concevoir une technologie ambiante pour le maintien à domicile : une démarche prospective par la prise en compte des systèmes d'activité. *Le Travail Humain*, 77(1), 39. <https://doi.org/10.3917/th.771.0039>
- Bobillier Chaumon, M.-E., Cuvillier, B., Sarnin, P., & Vacherand-Revel, J. (2013). Le développement de l'expérience professionnelle des cadres dans un environnement médiatisé. *Education Permanente*, 4(197), 61–70.
- Bobillier Chaumon, M.-E., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le Travail Humain*, 72(4), 355–382. <https://doi.org/10.3917/th.724.0355>
- Bobillier Chaumon, M.-E., Dubois, M., & Retour, D. (2006). L'acceptation des nouvelles technologies d'information: le cas des systèmes d'information en milieu bancaire. *Psychologie Du Travail et Des Organisations*, 12(4), 247–262. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2006.05.002>
- Boccaro, V., & Delgoulet, C. (2015). L'analyse des travaux pour la conception en formation. *Activités*, 12(2), 73–97. En ligne <http://www.activites.org/v12n2/V12n2.pdf>
- Bouchard, S., Robillard, G., & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the

- simulator sickness questionnaire. *Annual Review of Cyber Therapy and Telemedicine*, 5, 117–122.
- Boudokhane, F. (2006). Comprendre le non-usage technique : réflexions théoriques Feirouz Boudokhane. *Les Enjeux de l'information et de La Communication*, 1, 13–22.
- Bowman, D. A., Gabbard, J. L., & Hix, D. (2002). A Survey of Usability Evaluation in Virtual Environments: Classification and Comparison of Methods. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(4), 404–424. <https://doi.org/10.1162/105474602760204309>
- Bowman, D. A., Koller, D., & Hodges, L. F. (1998). A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments. *Virtual Reality*, 3(2), 120–131. <https://doi.org/10.1007/BF01417673>
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40(7), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>
- Brady, E., Thies, W., & Cutrell, E. (2014). No access, no knowledge, or no interest? Examining use and non-use of assistive technologies. *Msr-Waypoint.Com*, 221. En ligne <http://nonuse.jedbrubaker.com/wp-content/uploads/2014/03/non-use-assistive-tech.pdf>
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser : adapter les technologies à l'homme*. Paris: Editions d'Organisations.
- Brangier, E., & Bastien, J. M. C. (2010). L'évolution de l'ergonomie des produits informatiques : accessibilité, utilisabilité, émotionnalité et influençabilité. In G. Valléry, M.-C. Le Port, & M. Zouinar (Eds.), *Ergonomie, conception de produits et services médiatisés* (pp. 307–328). Paris: Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.lepo.2010.01.0307>
- Brangier, E., Dufresne, A., & Hammes-Adelé, S. (2009). Approche symbiotique de la relation humain-technologie: perspectives pour l'ergonomie informatique. *Le Travail Humain*, 72(4), 333–353. <https://doi.org/10.3917/th.724.0333>
- Brangier, E., Hammes-Adelé, S., & Bastien, J. M. C. (2010). Analyse critique des approches de l'acceptation des technologies : de l'utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation. *Revue Europeene de Psychologie Appliquee*, 60(2), 129–146. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2009.11.002>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>
- Breton, P., & Proulx, S. (2002). *L'explosion de la communication à l'aube du XXIe siècle*. Paris: La Découverte.
- Brooke, J. (1996). SUS: a “quick and dirty” usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability Evaluation in Industry* (pp. 189–194). London, UK: Taylor & Francis.
- Brown, S. A., Massey, A. P., Montoya-Weiss, M. M., & Burkman, J. R. (2002). Do I really have to? User acceptance of mandated technology. *European Journal of Information Systems*, 11(4), 283–295. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000438>

- Bruno, F., & Muzzupappa, M. (2010). Product interface design: A participatory approach based on virtual reality. *International Journal of Human-Computer Studies*, 68(5), 254–269. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2009.12.004>
- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66(1), 65–91. <https://doi.org/10.3917/th.661.0065>
- Burkhardt, J.-M., & Sperandio, J.-C. (2004). Ergonomie et conception informatique. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (p. 437). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0437>
- Cahour, B. (2002). Décalages socio-cognitifs en réunions de conception participative. *Le Travail Humain*, 65(4), 315–337. <https://doi.org/10.3917/th.654.0315>
- Cahour, B. (2010). Emotions, affects et confort comme nouveaux déterminants de l'activité et de l'usage. In G. Valléry, M.-C. Le Port, & M. Zouinar (Eds.), *Ergonomie, conception de produits et services médiatisés* (pp. 273–305). Paris: PUF.
- Cahour, B., Salembier, P., & Zouinar, M. (2016). Analyzing lived experience of activity. *Le Travail Humain*, 79(3), 259–284. <https://doi.org/10.3917/th.793.0259>
- Carpentier, K., & Lourdeaux, D. (2014). Generation of Learning Situations According to the Learner's Profile Within a Virtual Environment. In J. Filipe & A. Fred (Eds.), *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 449, pp. 245–260). Berlin, Allemagne: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44440-5_15
- Cheng, G. (2014). Exploring students' learning styles in relation to their acceptance and attitudes towards using Second Life in education: A case study in Hong Kong. *Computers & Education*, 70, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.08.011>
- Chertoff, D. B., Goldiez, B., & LaViola, J. J. (2010). Virtual experience test: A virtual environment evaluation questionnaire. In B. Lok, G. Klinker, & R. Nakatsu (Eds.), *Proceedings - IEEE Virtual Reality 2010* (pp. 103–110). Washington, DC: IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444804>
- Chin, W. W. (1998). The Partial Least Squares Approach to Structural Equation Modeling. In G. A. Marcoulides (Ed.), *Modern methods for business research* (pp. 295–358). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Choi, J. K., & Ji, Y. G. (2015). Investigating the Importance of Trust on Adopting an Autonomous Vehicle. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 31(10), 692–702. <https://doi.org/10.1080/10447318.2015.1070549>
- Chow, M., Herold, D. K., Choo, T. M., & Chan, K. (2012). Extending the technology acceptance model to explore the intention to use Second Life for enhancing healthcare education. *Computers and Education*, 59(4), 1136–1144. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.05.011>
- Cipresso, P., Giglioli, I. A. C., Raya, M. A., & Riva, G. (2018). The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>
- CNRTL. (n.d.-a). Décision. En ligne <https://www.cnrtl.fr/definition/décision>

- CNRTL. (n.d.-b). Intention. En ligne <https://www.cnrtl.fr/definition/intention>
- Cobb, S. V. G., Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(2), 169–186. <https://doi.org/10.1162/105474699566152>
- Codd, A. M., & Choudhury, B. (2011). Virtual reality anatomy: Is it comparable with traditional methods in the teaching of human forearm musculoskeletal anatomy? *Anatomical Sciences Education*, 4(3), 119–125. <https://doi.org/10.1002/ase.214>
- Codreanu, E., Michel, C., Bobillier-Chaumon, M.-E., & Vigneau, O. (2015). L'acceptation des ENT (Environnements Numériques de Travail) par les enseignants du primaire. *Sticef*, 24(1), 1–39. <https://doi.org/10.23709/sticef.24.1.1>
- Cœugnet, S., Dommès, A., Panëels, S., Chevalier, A., Vienne, F., Dang, N. T., & Anastassova, M. (2018). Helping older pedestrians navigate unknown environments through vibrotactile guidance instructions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 816–830. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.07.017>
- Compeau, D. R., & Higgins, C. A. (1995). Computer Self-Efficacy: Development of a Measure and Initial Test. *MIS Quarterly*, 19(2), 189. <https://doi.org/10.2307/249688>
- Crouzat, P., & Bobillier Chaumon, M.-E. (2017). Technologies collaboratives : usages et impacts au sein de l'activité collective. *La Revue Des Conditions de Travail*, 6, 145–152.
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: the psychology of optimal experience*. New York, NY: Harper & Row.
- Daniellou, F. (2004). L'ergonomie dans la conduite de projets de conception de systèmes de travail. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 359–373). Paris: Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0359>
- Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activites*, 4(2), 77–83. <https://doi.org/10.4000/activites.1696>
- Darses, F., Détienne, F., Falzon, P., & Visser, W. (2001). *COMET. A Method for Analysing Collective Design Processes*. En ligne <https://hal.inria.fr/inria-00072330>
- Darses, F., Hoc, J.-M., & Chauvin, C. (2004). Cadres théoriques et méthodes de production de connaissances en psychologie ergonomique. *J.M. Hoc & F. Darses (Eds.). Psychologie Ergonomique: Tendances Actuelles*, 221–251. <https://doi.org/10.3917/puf.hocj.2004.01.0221>
- Davis, F. D. (1986). *A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems*. Massachusetts Institute of Technology (Thèse de Doctorat). Massachusetts Institute of Technology. En ligne <http://hdl.handle.net/1721.1/15192>
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319-340.
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1992). Extrinsic and Intrinsic Motivation to Use Computers in the Workplace. *Journal of Applied Social Psychology*, 22(14), 1111–1132. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1992.tb00945.x>
- Davis, F. D., Bagozzi, R., & Warshaw, P. (1989). User acceptance of computer

- technology: A comparison of two theoretical models. *Management Science*, 35(8), 982–1002. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.8.982>
- Decortis, F., Noirfalise, S., & Saudelli, B. (2000). Activity theory, cognitive ergonomics and distributed cognition: three views of a transport company. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(1), 5–33. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2000.0378>
- Delgoulet, C., Boccara, V., Carpentier, K., & Lourdeaux, D. (2015). How designing a virtual environment for professional training from an activity framework ? Dialog between ergonomists and computer scientists. In G. Lindgaard & D. Moore (Eds.), *Proceedings 19th Triennial Congress of the IEA* (pp. 1–2). Thônex, Switzerland: International Ergonomics Association.
- DeLone, W. H., & McLean, E. R. (1992). Information systems success: The quest for the dependent variable. *Information Systems Research*, 3(1), 60–95. <https://doi.org/10.1287/isre.3.1.60>
- DeLone, W. H., & McLean, E. R. (2003). The DeLone and McLean model of information systems success: A ten-year update. *Journal of Management Information Systems / Spring*, 19(4), 9–30. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914199107>
- DeSanctis, G., & Poole, M. S. (2008). Capturing the Complexity in Advanced Technology Use: Adaptive Structuration Theory. *Organization Science*, 5(2), 121–147. <https://doi.org/10.1287/orsc.5.2.121>
- Diefenbach, S., Kolb, N., & Hassenzahl, M. (2014). The ‘Hedonic’ in Human-Computer Interaction – History, Contributions, and Future Research Directions. *Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems*, (June), 305–314. <https://doi.org/10.1145/2598510.2598549>
- Diels, C., & Howarth, P. a. (2013). Frequency Characteristics of Visually Induced Motion Sickness. *Human Factors*, 55(3), 595–604. <https://doi.org/10.1177/0018720812469046>
- Dillon, A., & Morris, M. (1999). Power, perception and performance: From usability engineering to technology acceptance with the P3 model of user response. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 43, 1017–1021. <https://doi.org/10.1177/154193129904301901>
- Direction Générale des Entreprises. (2016). *Technologies clés 2020 : Préparer l'industrie du futur*. En ligne <https://www.entreprises.gouv.fr/politique-et-enjeux/etude-technologies-cles-2020>
- Dourish, P. (2003). The appropriation of interactive technologies: some lessons from placeless documents. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12(4), 465–490. <https://doi.org/10.1023/A:1026149119426>
- Draper, J. V, Kaber, D. B., & Usher, J. M. (1998). Telepresence. *Human Factors*, 40(3), 354–375. <https://doi.org/10.1518/001872098779591386>
- Duarte, P., & Amaro, S. (2018). Methods for modelling reflective-formative second order constructs in PLS. *Journal of Hospitality and Tourism Technology*, 9(3), 295–313. <https://doi.org/10.1108/JHTT-09-2017-0092>
- Dubois, M., Bobillier Chaumon, M.-E., & Ngom, L. (2015). L'acceptation des technologies : quels apports des modèles d'acceptabilité ? In M. El-Hachani (Ed.), *Information, TIC et mutualisation : regards croisés entre praticiens et chercheurs*

- (pp. 69–103). Paris: Michel Houdiard.
- Elias, S. M., Smith, W. L., & Barney, C. E. (2012). Age as a moderator of attitude towards technology in the workplace: Work motivation and overall job satisfaction. *Behaviour & Information Technology*, 31(5), 453–467. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2010.513419>
- Engeström, Y. (2000). Activity theory as a framework for analyzing and redesigning work. *Ergonomics*, 43(7), 960–974. <https://doi.org/10.1080/001401300409143>
- Engeström, Y. (2001). Expansive Learning at Work: toward an activity theoretical reconceptualization. *Journal of Education and Work*, 14(1), 133–156. <https://doi.org/10.1080/13639080123238>
- Engeström, Y. (2014). *Learning by Expanding: An Activity-Theoretical Approach to Developmental Research* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9781139814744>
- Fagan, M., Kilmon, C., & Pandey, V. (2012). Exploring the adoption of a virtual reality simulation. *Campus-Wide Information Systems*, 29(2), 117–127. <https://doi.org/10.1108/10650741211212368>
- Fang, T. Y., Wang, P. C., Liu, C. H., Su, M. C., & Yeh, S. C. (2014). Evaluation of a haptics-based virtual reality temporal bone simulator for anatomy and surgery training. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 113(2), 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.11.005>
- Fetscherin, M., & Lattemann, C. (2008). User acceptance of virtual worlds. *Journal of Electronic Commerce Research*, 9(3), 231–242.
- Février, F. (2011). *Vers un modèle intégrateur “expérience-acceptation” : rôle des affects et de caractéristiques personnelles et contextuelles dans la détermination d’usage d’un environnement numérique de travail* (Thèse de Doctorat). Université de Rennes 2. En ligne <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00608335/document>
- Finstad, K. (2010). The Usability Metric for User Experience. *Interacting with Computers*, 22(5), 323–327. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.004>
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research*. Reading, MA, Etats-Unis: Addison-Wesley.
- Folcher, V., & Rabardel, P. (2004). Hommes, artefacts, activités : perspective instrumentale. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 251–268). Paris: PUF. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0251>
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating Structural Equation Models with Unobservable Variables and Measurement Error. *Journal of Marketing Research*, 18(1), 39–50. En ligne <http://www.jstor.org/stable/3151312>
- Fornells-Ambrojo, M., Barker, C., Swapp, D., Slater, M., Antley, A., & Freeman, D. (2008). Virtual reality and persecutory delusions: Safety and feasibility. *Schizophrenia Research*, 104(1–3), 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2008.05.013>
- Fowler, K. R. (2015). Review. In K. R. Fowler & S. L. Craig (Eds.), *Developing and Managing Embedded Systems and Products* (pp. 535–557). Boston, MA: Newnes. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405879-8.00013-1>
- Frandsen, A., Berghede, K., & Tommelein, I. D. (2013). Takt time planning for

- construction of exterior cladding. In C. T. Formoso & P. Tzortzopoulos (Eds.), *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2013, IGLC 2013* (Vol. 1, pp. 464–473). En ligne <http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/20860/>
- Freeman, D., Bradley, J., Antley, A., Bourke, E., DeWeever, N., Evans, N., ... Clark, D. M. (2016). Virtual reality in the treatment of persecutory delusions: randomised controlled experimental study testing how to reduce delusional conviction. *The British Journal of Psychiatry*, *209*(1), 62–67. <https://doi.org/10.1192/bjp.bp.115.176438>
- Freeman, I. J., Salmon, J. L., & Coburn, J. Q. (2016). CAD Integration in Virtual Reality Design Reviews for Improved Engineering Model Interaction. In *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 11, pp. 1–10). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2016-66948>
- Fuchs, P. (2006). Les interfaces à simulation de mouvement et les interfaces à simulation de climat. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Volume 2, pp. 297–315). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., Berthoz, A., & Vercher, J.-L. (2006). Introduction à la réalité virtuelle. In P. Fuchs, A. Berthoz, & J.-L. Vercher (Eds.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle (Volume 1)* (pp. 3–22). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., Burkhardt, J.-M., & Lourdeaux, D. (2006). Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle. In P. Fuchs, A. Berthoz, & J.-L. Vercher (Eds.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle (Volume 2)* (pp. 19–60). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Fuchs, P., & Mathieu, H. (2011). Location sensors. In P. Fuchs, G. Moreau, & P. Guitton (Eds.), *Virtual Reality: Concepts and Technologies* (pp. 105–121). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A., & Vercher, J.-L. (2006). Volume 1 : l'homme et l'environnement virtuel. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Traité de la réalité virtuelle* (Vol. 1). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Gaggioli, A. (2017). An Open Research Community for Studying Virtual Reality Experience. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *20*(2), 138–139. <https://doi.org/10.1089/cyber.2017.29063.csi>
- Ganier, F., Hoareau, C., & Devillers, F. (2013). Évaluation des performances et de la charge de travail induits par l'apprentissage de procédures de maintenance en environnement virtuel. *Le Travail Humain*, *76*(4), 335. <https://doi.org/10.3917/th.764.0335>
- Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. (2013). Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*, *23*(6), 1–21. <https://doi.org/10.1080/10494820.2013.815221>
- Gero, J. S., & Mc Neill, T. (1998). An approach to the analysis of design protocols. *Design Studies*, *19*(1), 21–61. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(97\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(97)00015-X)
- Gibson, C. B. (2016). Elaboration, Generalization, Triangulation, and Interpretation. *Organizational Research Methods*, *20*(2), 193–223. <https://doi.org/10.1177/1094428116639133>

- Giddens, A. (1984). *The Constitution of Society: Outline of the Theory of Structuration*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Gomes De Sá, A., & Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 23(3), 389–403. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(99\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00047-3)
- Gorecky, D., Khamis, M., & Mura, K. (2015). Introduction and establishment of virtual training in the factory of the future. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(1), 1–9. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067918>
- Gosselin, F., & Andriot, C. (2006). Les dispositifs matériels des interfaces à retour d'effort. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de la réalité virtuelle* (Volume 2, pp. 135–202). Paris: Les Presses de l'École des Mines de Paris.
- Gouvernement Français. (2016). *Nouvelle France Industrielle : Construire l'industrie française du futur*. En ligne <https://www.gouvernement.fr/action/la-nouvelle-france-industrielle>
- Grajewski, D., Górski, F., Zawadzki, P., & Hamrol, A. (2013). Application of virtual reality techniques in design of ergonomic manufacturing workplaces. *Procedia Computer Science*, 25, 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.035>
- Guo, X., & Yang, G. (2013). Animating prairies simulation with shell method in real-time. *Journal of Software*, 8(12), 3166–3172. <https://doi.org/10.4304/jsw.8.12.3166-3172>
- Haenlein, M., & Kaplan, A. M. (2004). A Beginner's Guide to Partial Least Squares Analysis. *Understanding Statistics*, 3(4), 283–297. https://doi.org/10.1207/s15328031us0304_4
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C., & Sarstedt, M. (2014). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. Thousand Oaks, CA: SAGE.
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet. *The Journal of Marketing Theory and Practice*, 19(2), 139–152. <https://doi.org/10.2753/MTP1069-6679190202>
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Hopkins, L., & Kuppelwieser, V. G. (2014). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): An emerging tool in business research. *European Business Review*, 26(2), 106–121. <https://doi.org/10.1108/EBR-10-2013-0128>
- Hamid, N. S. S., Aziz, F. A., & Azizi, A. (2014). Virtual reality applications in manufacturing system. *Proceedings of 2014 Science and Information Conference, SAI 2014*, 1034–1037. <https://doi.org/10.1109/SAI.2014.6918317>
- Hamurcu, A. (2018). User Insights about Using Immersive Virtual Reality in Industrial Design Studio Courses. In *ISMSIT 2018 - 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, Proceedings* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2018.8567058>
- Hassenzahl, M. (2003). The Thing and I: Understanding the Relationship Between User and Product. In M. A. Blythe, K. Overbeeke, A. F. Monk, & P. C. Wright (Eds.), *Funology: From Usability to Enjoyment* (Vol. 3, pp. 31–42). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4
- Hassenzahl, M. (2008). User experience (UX): Towards an experiential perspective on

- product quality. In *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine on - IHM '08* (p. 11). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1512714.1512717>
- Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In G. Szwillus & J. Ziegler (Eds.), *Mensch & Computer 2003: Interaktion in Bewegung* (pp. 187–196). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80058-9_19
- Hassenzahl, M., Diefenbach, S., & Göritz, A. (2010). Needs, affect, and interactive products - Facets of user experience. *Interacting with Computers*, 22(5), 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.04.002>
- Hassenzahl, M., Platz, A., Burmester, M., & Lehner, K. (2000). Hedonic and ergonomic quality aspects determine a software's appeal. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems - CHI '00* (pp. 201–208). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/332040.332432>
- Heeter, C. (1992). Being There: The Subjective Experience of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 262–271. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.262>
- Helbig, C., Bauer, H.-S., Rink, K., Wulfmeyer, V., Frank, M., & Kolditz, O. (2014). Concept and workflow for 3D visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. *Environmental Earth Sciences*, 72(10), 3767–3780. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3136-6>
- Herrero, R., Bretón-López, J., Farfallini, L., Quero, S., Miralles, I., Baños, R., & Botella, C. (2015). Acceptability and satisfaction of an ICTs-based training for university teachers. *Educational Technology and Society*, 18(4), 498–510.
- Herz, M., & Rauschnabel, P. A. (2019). Understanding the diffusion of virtual reality glasses: The role of media, fashion and technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 138(October 2017), 228–242. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.09.008>
- Hornbæk, K. (2006). Current practice in measuring usability: Challenges to usability studies and research. *International Journal of Human Computer Studies*, 64(2), 79–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2005.06.002>
- Hou, Y., Kang, S., & Moon, T. (2019). Customers' Continuous Usage Intention of Virtual Reality (VR) Product. In *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing* (Vol. 1, pp. 14–26). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98367-7_2
- Hsiao, C. H., & Yang, C. (2011). The intellectual development of the technology acceptance model: A co-citation analysis. *International Journal of Information Management*, 31(2), 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2010.07.003>
- Hsu, S. Y., Fang, T. Y., Yeh, S. C., Su, M. C., Wang, P. C., & Wang, V. Y. (2017). Three-dimensional, virtual reality vestibular rehabilitation for chronic imbalance problem caused by Ménière's disease: a pilot study. *Disability and Rehabilitation*, 39(16), 1601–1606. <https://doi.org/10.1080/09638288.2016.1203027>
- Huang, H., & Liaw, S. (2018). An Analysis of Learners' Intentions Toward Virtual Reality Learning Based on Constructivist and Technology Acceptance

- Approaches, 19(1), 1–12.
- Huang, W. H. D., Hood, D. W., & Yoo, S. J. (2013). Gender divide and acceptance of collaborative Web 2.0 applications for learning in higher education. *Internet and Higher Education*, 16(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2012.02.001>
- Huang, Y.-C., Backman, S. J., Backman, K. F., McGuire, F. A., & Moore, D. (2018). An investigation of motivation and experience in virtual learning environments: a self-determination theory. *Education and Information Technologies*, (Boellstorff 2015), 1–21. <https://doi.org/10.1007/S10639-018-9784-5>
- Huang, Y.-C., Backman, S. J., Backman, K. F., & Moore, D. (2013). Exploring user acceptance of 3D virtual worlds in travel and tourism marketing. *Tourism Management*, 36, 490–501. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2012.09.009>
- Huang, Y. C., Backman, K. F., Backman, S. J., & Chang, L. L. (2016). Exploring the implications of virtual reality technology in tourism marketing: An integrated research framework. *International Journal of Tourism Research*, 18(2), 116–128. <https://doi.org/10.1002/jtr.2038>
- International Society for Presence Research. (2000). The concept of presence: explication statement. Retrieved August 13, 2018, from <https://ispr.info>
- Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Éléments pour une sociologie des processus de conception. *Sociologie Du Travail*, 40(3), 291–316.
- Jensen, K., Ringsted, C., Hansen, H. J., Petersen, R. H., & Konge, L. (2014). Simulation-based training for thoracoscopic lobectomy: A randomized controlled trial: Virtual-reality versus black-box simulation. *Surgical Endoscopy*, 28(6), 1821–1829. <https://doi.org/10.1007/s00464-013-3392-7>
- Jerald, J. (2016). Interaction. In J. Jerald (Ed.), *The VR Book* (pp. 275–368). New York, NY, USA: Morgan & Claypool Publishers. <https://doi.org/10.1145/2792790.2792820>
- Jordan, P. (2000). *Designing Pleasurable Products*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203305683>
- Kagermann, H., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*.
- Kaptelinin, V., & Nardi, B. (2006). *Acting with technology: activity theory and interaction design*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Kellner, C., Massou, L., & Morelli, P. (2010). (Re)penser le non-usage des tic. *Questions de Communication*, (18), 7–20. <https://doi.org/10.4000/questionsdecommunication.395>
- Kennedy, R., & Lane, N. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203–220.
- Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011). Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Human Factors*, 53(4), 415–426. <https://doi.org/10.1177/0018720811403736>
- Khan, M. W., Lin, D., Marlow, N., Altree, M., Babidge, W., Field, J., ... Maddern, G. (2014). Laparoscopic skills maintenance: A randomized trial of virtual reality and

- box trainer simulators. *Journal of Surgical Education*, 71(1), 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2013.05.009>
- Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 69, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>
- Kim, J., & Forsythe, S. (2008). Adoption of virtual try-on technology for online apparel shopping. *Journal of Interactive Marketing*, 22(2), 45–59. <https://doi.org/10.1002/dir.20113>
- Kim, J., & Forsythe, S. (2010). Factors affecting adoption of product virtualization technology for online consumer electronics shopping. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 38(3), 190–204. <https://doi.org/10.1108/09590551011027122>
- King, W. R., & He, J. (2006). A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information and Management*, 43(6), 740–755. <https://doi.org/10.1016/j.im.2006.05.003>
- Knowles, L. M., Stelzer, E.-M., Jovel, K. S., & O' Connor, M.-F. (2017). A pilot study of virtual support for grief: Feasibility, acceptability, and preliminary outcomes. *Computers in Human Behavior*, 73, 650–658. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.04.005>
- Kober, S. E., & Neuper, C. (2013). Personality and Presence in Virtual Reality: Does Their Relationship Depend on the Used Presence Measure? *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(1), 13–25. <https://doi.org/10.1080/10447318.2012.668131>
- Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO. (2013a). Questionnaire sur l'Etat de Présence (QEP). En ligne http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/pres/QEP_vf.pdf
- Laboratoire de Cyberpsychologie de l'UQO. (2013b). Questionnaire sur les cybermalaises. En ligne http://w3.uqo.ca/cyberpsy/docs/qaires/ssq/SSQ_vf.pdf
- Lallemant, C., Koenig, V., Gronier, G., & Martin, R. (2015). Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology*, 65(5), 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2015.08.002>
- Lallemant, Carine, & Gronier, G. (2018). *Méthodes de design UX : 30 méthodes pour concevoir des expériences optimales* (2e éd). Paris: Eyrolles.
- Lamb, R., Antonenko, P., Etopio, E., & Seccia, A. (2018). Comparison of virtual reality and hands on activities in science education via functional near infrared spectroscopy. *Computers and Education*, 124, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.014>
- Langley, A., Lawson, G., Hermawati, S., D'Cruz, M., Apold, J., Arlt, F., & Mura, K. (2016). Establishing the Usability of a Virtual Training System for Assembly Operations within the Automotive Industry. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(6), 667–679. <https://doi.org/10.1002/hfm.20406>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0.

- Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242.
<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Laumer, S., & Eckhardt, A. (2012). Why Do People Reject Technologies: A Review of User Resistance Theories. In Y. K. Dwivedi, M. R. Wade, & S. L. Schneberger (Eds.), *Information Systems Theory: Explaining and Predicting Our Digital Society* (Vol. 1, pp. 63–86). Verlag, NY: Springer Book. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6108-2_4
- LaViola, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 32(1), 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- Law, E. L.-C., Roto, V., Hassenzahl, M., Vermeeren, A. P. O. S., & Kort, J. (2009). Understanding, scoping and defining user experience. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI 09* (p. 719). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518813>
- Leduc, S., Valléry, G., Belhari, S., & Gaston, S. (2014). *Ergonomie des interfaces logicielles: conception, développement et évaluation*. Paris: Hermès Science Publications Lavoisier.
- Lee, H.-G., Chung, S., & Lee, W.-H. (2013). Presence in virtual golf simulators: The effects of presence on perceived enjoyment, perceived value, and behavioral intention. *New Media & Society*, 15(6), 930–946. <https://doi.org/10.1177/1461444812464033>
- Lee, K. M. (2004). Presence, Explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27–50. <https://doi.org/10.1093/ct/14.1.27>
- Lee, Y., Kozar, K. A., & Larsen, K. R. T. (2003). The Technology Acceptance Model: Past, present, and future. *Communications of the Association for Information Systems*, 12(1), 752–780. En ligne <http://infosys.coba.usf.edu/bs/Lee03-TAMcritique.pdf>
- Legris, P., Ingham, J., & Colletette, P. (2003). Why do people use information technology? A critical review of the technology acceptance model. *Information & Management*, 40(3), 191–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7206\(01\)00143-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7206(01)00143-4)
- Leontiev, A. (1974). The problem of activity in psychology. *Soviet Psychology*, 13, 4–33.
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. (2001). A Cross-Media Presence Questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 282–297. <https://doi.org/10.1162/105474601300343612>
- Lewis, J. R. (1995). IBM computer usability satisfaction questionnaires: Psychometric evaluation and instructions for use. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1), 57–78. <https://doi.org/10.1080/10447319509526110>
- Lewis, J. R., & Sauro, J. (2017). Revisiting the Factor Structure of the System Usability Scale. *Journal of Usability Studies*, 12, 183–192. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02806-9_12
- Lin, C.-S., Jeng, M.-Y., & Yeh, T.-M. (2018). The Elderly Perceived Meanings and Values of Virtual Reality Leisure Activities: A Means-End Chain Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 663.

<https://doi.org/10.3390/ijerph15040663>

- Lin, J. J. W., & Parker, D. E. (2007). User Experience Modeling and Enhancement for Virtual Environments That Employ Wide-Field Displays. In *Digital Human Modeling* (pp. 423–433). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73321-8_49
- Liu, N., & Yu, R. (2017). Identifying design feature factors critical to acceptance and usage behavior of smartphones. *Computers in Human Behavior*, 70, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.12.073>
- Liu, Y., Lather, J., & Messner, J. (2014). Virtual Reality to Support the Integrated Design Process: A Retrofit Case Study. In R. Issa & I. Flood (Eds.), *Computing in Civil and Building Engineering* (pp. 801–808). Reston, VA: ASCE Library. <https://doi.org/10.1061/9780784413616.100>
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- Loup-Escande, É., Burkhardt, J.-M., & Richir, S. (2013). Anticiper et évaluer l'utilité dans la conception ergonomique des technologies émergentes : une revue. *Le Travail Humain*, 76(1), 27. <https://doi.org/10.3917/th.761.0027>
- Luse, A., Mennecke, B., & Triplett, J. (2012). The changing nature of user attitudes toward virtual world technology: A longitudinal study. *Computers in Human Behavior*, 29(3), 1122–1132. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.10.004>
- MacKenzie, S. B., Podsakoff, P. M., & Jarvis, C. B. (2005). The Problem of Measurement Model Misspecification in Behavioral and Organizational Research and Some Recommended Solutions. *Journal of Applied Psychology*, 90(4), 710–730. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.90.4.710>
- Maffei, L., Masullo, M., Pascale, A., Ruggiero, G., & Puyana Romero, V. (2015). On the validity of immersive virtual reality as tool for multisensory evaluation of urban spaces. *Energy Procedia*, 78, 471–476. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.703>
- Maher, M. L., Gül, L. F., & Bilda, Z. (2000). Studying design behaviour in collaborative virtual environments. *Design*.
- Mahlke, S. (2008). User Experience of Interaction with Technical Systems: Theories, Methods, Empirical Results, and Their Application to the Development of Interactive Systems. *Dissertation*, 144. En ligne <http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2008/1783/>
- Makransky, G., & Lilleholt, L. (2018). A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education. *Educational Technology Research and Development*. <https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2>
- Makransky, G., Lilleholt, L., & Aaby, A. (2017). Development and validation of the Multimodal Presence Scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach. *Computers in Human Behavior*, 72, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.02.066>
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning.

- Manis, K. T., & Choi, D. (2019). The virtual reality hardware acceptance model (VR-HAM): Extending and individuating the technology acceptance model (TAM) for virtual reality hardware. *Journal of Business Research*, 100, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.021>
- Mansour, K. Ben, & Bouslama, N. (2012). Analyse de l'intention d'usage de la banque par internet : une extension du modèle d'acceptation de la technologie. In *Congrès international de l'Association Française de Marketing*. Brest, France. En ligne 20120603150143_S13_1_Ben_Mansour_et_Bouslama.pdf
- Marangunić, N., & Granić, A. (2015). Technology acceptance model: a literature review from 1986 to 2013. *Universal Access in the Information Society*, 14(1), 81–95. <https://doi.org/10.1007/s10209-014-0348-1>
- Marasco, A., Buonincontri, P., van Niekerk, M., Orłowski, M., & Okumus, F. (2018). Exploring the role of next-generation virtual technologies in destination marketing. *Journal of Destination Marketing & Management*, 9, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2017.12.002>
- Martin, N., Erhel, S., Jamet, É., & Rouxel, G. (2015). Quels liens entre expérience utilisateur et acceptabilité? In *Actes de la 27e Conference francophone sur l'Interaction Homme-Machine IHM 2015* (pp. 1–6). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2820619.2825015>
- Martin, N., Jamet, E., Erhel, S., & Rouxel, G. (2016). From acceptability to acceptance: does experience with the product influence user initial representations? In C. Stephanidis (Ed.), *HCI International 2016 – Posters' Extended Abstracts* (Vol. 617). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40548-3>
- McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- McMahan, R. P., Bowman, D. A., Zielinski, D. J., & Brady, R. B. (2012). Evaluating display fidelity and interaction fidelity in a virtual reality game. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(4), 626–633. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2012.43>
- Meehan, M., Insko, B., Whitton, M., & Brooks, F. P. (2002). Physiological measures of presence in stressful virtual environments. In *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '02* (p. 645). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/566570.566630>
- Melas, C. D., Zampetakis, L. A., Dimopoulou, A., & Moustakis, V. (2011). Modeling the acceptance of clinical information systems among hospital medical staff: An extended TAM model. *Journal of Biomedical Informatics*, 44(4), 553–564. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2011.01.009>
- Merchant, Z., Goetz, E. T., Keeney-Kennicutt, W., Kwok, O., Cifuentes, L., & Davis, T. J. (2012). The learner characteristics, features of desktop 3D virtual reality environments, and college chemistry instruction: A structural equation modeling

- analysis. *Computers & Education*, 59(2), 551–568. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.02.004>
- Mestre, D., & Fuchs, P. (2006). Immersion et présence. In P. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le Traité de la Réalité Virtuelle* (Volume 1, pp. 309–338). Paris: Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- Midler, C. (1996). *L'auto qui n'existait pas : management des projets et transformation de l'entreprise*. Paris: InterEditions.
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *Omni*, 2, 45–51.
- Molich, R., & Nielsen, J. (1990). Improving a Human-Computer Dialogue. *Communication of the ACM*, 33(3), 11.
- Moore, G. C., & Benbasat, I. (1991). Development of an Instrument to Measure the Perceptions of Adopting an Information Technology Innovation. *Information Systems Research*, 2(3), 192–222. <https://doi.org/10.1287/isre.2.3.192>
- Moraes, T. M., de Andrade, A. F., & Paiva, W. S. (2016). Virtual reality for the treatment of posttraumatic disorders. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 12, 785–786. <https://doi.org/10.2147/NDT.S105538>
- Moreau, G., Fuchs, P., & Stergiopoulos, P. (2004). Applications of Virtual Reality in the manufacturing industry: from design review to ergonomic studies. *Mécanique & Industries*, 5(2), 171–179. <https://doi.org/10.1051/meca:2004018>
- Morrongiello, B. A., Corbett, M., Koutsoulanos, S., & Foster, A. (2019). Effects of Peers on Child Pedestrian Behaviors in a Virtual Traffic Context. *Journal of Pediatric Psychology*, 44(4), 509–516. <https://doi.org/10.1093/jpepsy/jsy103>
- Moser, T., Hohlagschwandtner, M., Kormann-Hainzl, G., Pölzlbauer, S., & Wolfartsberger, J. (2019). Mixed Reality Applications in Industry: Challenges and Research Areas. In *SWQD 2019: Software Quality: The Complexity and Challenges of Software Engineering and Software Quality in the Cloud* (Vol. 338, pp. 95–105). Cham, Suisse: Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05767-1_7
- Moss, J. D. D., & Muth, E. R. R. (2011). Characteristics of head mounted displays and their effects on simulator sickness. *Human Factors*, 53(3), 308–319. <https://doi.org/10.1177/0018720811405196>. Copyright
- Muhanna, M. A. (2015). Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 27(3), 344–361. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.023>
- Mujber, T. S., Szecsi, T., & Hashmi, M. S. J. (2004). Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156(1–3), 1834–1838. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401>
- Munafo, J., Diedrick, M., & Stoffregen, T. A. (2017). The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects. *Experimental Brain Research*, 235(3), 889–901. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4846-7>
- Murthy, S. R., & Mani, M. (2013). Discerning rejection of technology. *SAGE Open*, 3(2), 1–10. <https://doi.org/10.1177/2158244013485248>

- Mütterlein, J., & Hess, T. (2017). Immersion, presence, interactivity: Towards a joint understanding of factors influencing virtual reality acceptance and use. In *23rd Americas Conference on Information Systems (AMCIS)* (pp. 1–10). Boston, MA.
- Neves, B. B., Amaro, F., & Fonseca, J. R. S. (2013). Coming of (Old) Age in the Digital Age: ICT Usage and Non-Usage among Older Adults. *Sociological Research Online*, *18*(2), 1–14. <https://doi.org/10.5153/sro.2998>
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Boston, MA: Academic Press.
- Nielsen, J. (1994). Usability inspection methods. In *Conference companion on Human factors in computing systems - CHI '94* (pp. 413–414). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/259963.260531>
- Nielsen, J., & Loranger, H. (2006). *Prioritizing web usability*. Berkeley CA: New Riders Press.
- Nielsen, J., & Molich, R. (1990). Heuristic evaluation of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems Empowering people - CHI '90* (Vol. 73, pp. 249–256). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/97243.97281>
- Noldus. (2017). The Observer XT 14 [Logiciel]. En ligne <https://www.noldus.com/human-behavior-research/products/the-observer-xt>
- Norman, D. (2004). *Emotional Design*. New York: Basic Books.
- Oliver, R. L. (1980). A cognitive model of the antecedents and consequences of satisfaction decisions. *Journal of Marketing Research*, *17*(4), 460. <https://doi.org/10.2307/3150499>
- Oliver, R. L. (1981). Measurement and evaluation of satisfaction processes in retail settings. *Journal of Retailing*, *57*(3), 25–48. <https://doi.org/10.1023/A>
- Olson, G., Olson, J., Carter, M., & Storosten, M. (1992). Small Group Design Meetings: An Analysis of Collaboration. *Human-Computer Interaction*, *7*(4), 347–374. https://doi.org/10.1207/s15327051hci0704_1
- Ordaz, N., Romero, D., Gorecky, D., & Siller, H. R. (2015). Serious games and virtual simulator for automotive manufacturing education & training. *Procedia Computer Science*, *75*, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.247>
- Orlikowski, W. J. (1992). The Duality of Technology: Rethinking the Concept of Technology in Organizations. *Organization Science*, *3*(3), 398–427.
- Orlikowski, W. J. (2000). Using technology and constituting structures: A practice lens for studying technology in organizations. *Organization Science*, *11*(4), 404–428. <https://doi.org/10.1287/orsc.11.4.404.14600>
- Paes, D., Arantes, E., & Irizarry, J. (2017). Automation in Construction Immersive environment for improving the understanding of architectural 3D models: Comparing user spatial perception between immersive and traditional virtual reality systems. *Automation in Construction*, *84*(August 2016), 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.016>
- Pavageau, P., Nascimento, A., & Falzon, P. (2007). Les risques d'exclusion dans un contexte de transformation organisationnelle. *Perspectives Interdisciplinaires Sur Le Travail et La Santé*, *9*(2), 1–21. <https://doi.org/10.4000/pistes.2960>

- Peng, W., Kanthawala, S., Yuan, S., & Hussain, S. A. (2016). A qualitative study of user perceptions of mobile health apps. *BMC Public Health*, *16*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-3808-0>
- Pimentel, K., & Teixeira, K. (1994). *La réalité virtuelle : de l'autre côté du miroir*. Paris: Addison-Wesley.
- Polivka, B. J., Anderson, S., Lavender, S. A., Sommerich, C. M., Stredney, D. L., Wills, C. E., & Darragh, A. R. (2019). Efficacy and Usability of a Virtual Simulation Training System for Health and Safety Hazards Encountered by Healthcare Workers. *Games for Health Journal*, *8*(2), 121–128. <https://doi.org/10.1089/g4h.2018.0068>
- Pontonnier, C., Dumont, G., Samani, A., Madeleine, P., & Badawi, M. (2014). Designing and evaluating a workstation in real and virtual environment: Toward virtual reality based ergonomic design sessions. *Journal on Multimodal User Interfaces*, *8*(2), 199–208. <https://doi.org/10.1007/s12193-013-0138-8>
- Porcino, T. M., Clua, E. W., Vasconcelos, C. N., Trevisan, D., & Valente, L. (2016). Minimizing cyber sickness in head mounted display systems: design guidelines and applications, 0–5. <https://doi.org/10.1109/SeGAH.2017.7939283>
- Poupon, L., Philipps-Bertin, C., Bobillier Chaumon, M.-E., & Kalampalikis, N. (2017). L'acceptation de la voiture électrique : un agent transformateur des pratiques socio-domestiques. *Activites*, *14*(2), 0–32. <https://doi.org/10.4000/activites.3044>
- QSR International Pty Ltd. (2019). Nvivo 12 [Logiciel]. En ligne <http://www.qsrinternational.com/nvivo-french>
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies; approche cognitive des instruments contemporains*. Paris: Armand Colin.
- Rahimian, F. P., & Ibrahim, R. (2011). Impacts of VR 3D sketching on novice designers' spatial cognition in collaborative conceptual architectural design. *Design Studies*, *32*(3), 255–291. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2010.10.003>
- Rasimah, C. M. Y., Ahmad, A., & Zaman, H. B. (2011). Evaluation of user acceptance of mixed reality technology. *Australasian Journal of Educational Technology*, *27*(8), 1369–1387. <https://doi.org/10.14742/ajet.899>
- Rauch, M. (2011). Mobile documentation: Usability guidelines, and considerations for providing documentation on Kindle, tablets, and smartphones. In *2011 IEEE International Professional Communication Conference* (pp. 1–13). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IPCC.2011.6087221>
- Ready, D. J., Gerardi, R. J., Backscheider, A. G., Mascaro, N., & Rothbaum, B. O. (2010). Comparing Virtual Reality Exposure Therapy to Present-Centered Therapy with 11 U.S. Vietnam Veterans with PTSD. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, *13*(1), 49–54. <https://doi.org/10.1089/cyber.2009.0239>
- Rebenitsch, L., & Owen, C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. *Virtual Reality*, *20*(2), 101–125. <https://doi.org/10.1007/s10055-016-0285-9>
- Regan, C. (1997). Some Effects of Using Virtual Reality Technology. In *Virtual Reality, Training's Future?* (pp. 77–83). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0038-8_9

- Relieu, M., Salembier, P., & Theureau, J. (2004). Introduction au numéro spécial « Activité et Action / Cognition Située ». *Activités*, 1(2), 3–10. En ligne <http://activites.revues.org/1215>
- Rogers, E. M. (1962). *Diffusion of innovations*. New York, NY: Free Press.
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of innovations*. New York: Free Press.
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). The Internet of Things : an overview - Understanding the issues and challenges of a more connected world. *The Internet Society*, 1–53.
- Sacks, R., Perlman, A., & Barak, R. (2013). Construction safety training using immersive virtual reality. *Construction Management and Economics*, 31(9), 1005–1017. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.828844>
- Sagnier, C., Loup-Escande, E., & Valléry, G. (sous presse). Acceptabilité de la réalité virtuelle : une revue de la littérature. *Le Travail Humain*, 82(3).
- Salovaara, A., & Tamminen, S. (2009). Acceptance or appropriation? A design-oriented critique on technology acceptance models. In P. Saariluoma & H. Isomäki (Eds.), *Future Interaction Design II* (pp. 157–173). London: Springer.
- Sarstedt, M., Ringle, C. M., Smith, D., Reams, R., & Hair, J. F. (2014). Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): A useful tool for family business researchers. *Journal of Family Business Strategy*, 5(1), 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.jfbs.2014.01.002>
- Satchell, C., & Dourish, P. (2009). Beyond the user: Use and non-use in HCI. *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group - Design: Open 24/7, OZCHI '09*, 411(November), 9–16. <https://doi.org/10.1145/1738826.1738829>
- Scapin, D. L., & Bastien, J. M. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16(4–5), 220–231. <https://doi.org/10.1080/014492997119806>
- Schubert, T., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 266–281. <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- Schuemie, M. J., van der Straaten, P., Krijn, M., & van der Mast, C. A. P. G. (2001). Research on Presence in Virtual Reality: A Survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 183–201. <https://doi.org/10.1089/109493101300117884>
- Serge, S. R., & Moss, A. D. (2015). Simulator sickness and the oculus rift: A first look. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 2015-Janua*, 761–765. <https://doi.org/10.1177/1541931215591236>
- Shackel, B. (1991). Ergonomics in design and usability. In *People and computers: designing for usability* (Cambridge, pp. 44–64). Cambridge.
- Sharp, J. H. (2007). Development, Extension, and Application: A Review of the Technology Acceptance Model. *Information Systems Education Journal*, 5(9), 1–11. En ligne [http://www.isedj.org/5/9/ISEDJ.5\(9\).Sharp.pdf](http://www.isedj.org/5/9/ISEDJ.5(9).Sharp.pdf)
- Sharples, S., Cobb, S., Moody, A., & Wilson, J. R. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2), 58–69.

<https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.005>

- Sheridan, T. B. (1992). Musings on Telepresence and Virtual Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 120–126. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.120>
- Sheridan, T. B. (1996). Further Musings on the Psychophysics of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 5(2), 241–246. <https://doi.org/10.1162/pres.1996.5.2.241>
- Shin, D.-H., Biocca, F., & Choo, H. (2013). Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments. *Behaviour & Information Technology*, 32(2), 203–214. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2011.606334>
- Shin, D., Biocca, F., & Choo, H. (2013). Exploring the user experience of 3D virtual learning environments. *Behaviour & Information Technology*, 32(11), 1193–1193. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2013.782139>
- Shin, J. H., Ryu, H., & Jang, S. H. (2014). A task-specific interactive game-based virtual reality rehabilitation system for patients with stroke: A usability test and two clinical experiments. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-32>
- Shneiderman, B. (2004). Designing for fun. *Interactions*, 11(5), 48. <https://doi.org/10.1145/1015530.1015552>
- Simon, A., & Scholz, S. (2005). Multi-viewpoint images for multi-user interaction. In *Proceedings - IEEE Virtual Reality (VR'05)* (pp. 107–113).
- Skopp, N. A., Smolenski, D. J., Metzger-Abamukong, M. J., Rizzo, A. A., & Reger, G. M. (2014). A Pilot Study of the VirtuSphere as a Virtual Reality Enhancement. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(1), 24–31. <https://doi.org/10.1080/10447318.2013.796441>
- Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560–565. <https://doi.org/10.1162/105474699566477>
- Slater, M. (2018). Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology*, 109(3), 431–433. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- Slater, M., Guger, C., Edlinger, G., Leeb, R., Pfurtscheller, G., Antley, A., ... Friedman, D. (2006). Analysis of physiological responses to a social situation in an immersive virtual environment. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(5), 553–569. <https://doi.org/10.1162/pres.15.5.553>
- Slater, M., Usoh, M., & Chrysanthou, Y. (1995). The Influence of Dynamic Shadows on Presence in Immersive Virtual Environments. In M. Göbel (Ed.), *Virtual Environments '95* (pp. 8–21). Vienna: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9433-1_2
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 130–144. <https://doi.org/10.1162/pres.1994.3.2.130>
- Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603–616.

<https://doi.org/10.1007/s10750-008-9541-7>

- Smith, S. L., & Mosier, J. N. (1986). *Guidelines for designing user interface software*. Bedford, MA: Mitre Corporation.
- Stanney, K. M., Kennedy, R. S., & Drexler, J. M. (1997). Cybersickness is Not Simulator Sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 41(2), 1138–1142. <https://doi.org/10.1177/107118139704100292>
- Stanney, K. M., Mollaghasemi, M., Reeves, L., Breaux, R., & Graeber, D. A. (2003). Usability engineering of virtual environments (VEs): Identifying multiple criteria that drive effective VE system design. *International Journal of Human Computer Studies*, 58(4), 447–481. [https://doi.org/10.1016/S1071-5819\(03\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S1071-5819(03)00015-6)
- Stempfle, J., & Badke-Schaub, P. (2002). Thinking in design teams - an analysis of team communication. *Design Studies*, 23(5), 473–496. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(02\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(02)00004-2)
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: dimensions determining telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 33–56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
- Suchman, L. A. (1987). *Plans and situated actions: the problem of human machine communication*. Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press. En ligne <http://www.jstor.org/stable/2073874?origin=crossref>
- Sun, H. M., & Cheng, W. L. (2009). The input-interface of Webcam applied in 3D virtual reality systems. *Computers and Education*, 53(4), 1231–1240. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.06.006>
- Suwa, M., Purcell, T., & Gero, J. (1998). Macroscopic analysis of design processes based on a scheme for coding designers' cognitive actions. *Design Studies*, 19(4), 455–483. [https://doi.org/10.1016/S0142-694X\(98\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0142-694X(98)00016-7)
- Tcha-Tokey, K. (2018). *Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif*. Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers. En ligne <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01771595>
- Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., Loup, G., & Richir, S. (2018). Towards a Model of User Experience in Immersive Virtual Environments. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/7827286>
- Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., Canac, G., Farin, F., & Richir, S. (2015). Towards a user experience in immersive virtual environment model. In *Proceedings of the 27th Conference on l'Interaction Homme-Machine - IHM '15* (pp. 1–6). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2820619.2825006>
- Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2016). A questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference on - VRIC '16* (Vol. 16, pp. 1–5). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2927929.2927955>
- Terrade, F., Pasquier, H., Boulanger, J., Guingouain, G., & Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale: la prise en compte des déterminants sociaux dans

- l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Le Travail Humain*, 72(4), 383–395. <https://doi.org/10.3917/th.724.0383>
- Theart, R. P., Loos, B., & Niesler, T. R. (2017). Virtual reality assisted microscopy data visualization and colocalization analysis. *BMC Bioinformatics*, 18(64), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s12859-016-1446-2>
- Thornson, C. A., Goldiez, B. F., & Le, H. (2009). Predicting presence: Constructing the Tendency toward Presence Inventory. *International Journal of Human Computer Studies*, 67(1), 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.08.006>
- Thüring, M., & Mahlke, S. (2007). Usability, aesthetics and emotions in human–technology interaction. *International Journal of Psychology*, 42(4), 253–264. <https://doi.org/10.1080/00207590701396674>
- Tokel, S. T., & İslar, V. (2013). Acceptance of virtual worlds as learning space. *Innovations in Education and Teaching International*, 3297(January 2014), 1–11. <https://doi.org/10.1080/14703297.2013.820139>
- tom Dieck, D., tom Dieck, M. C., Jung, T., & Moorhouse, N. (2018). Tourists' virtual reality adoption: an exploratory study from Lake District National Park. *Leisure Studies*, 37(4), 371–383. <https://doi.org/10.1080/02614367.2018.1466905>
- Tractinsky, N. (2004). Toward the Study of Aesthetics in Information Technology. *25th International Conference on Information Systems*, (1994), 11–20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.635.13>
- Trevino, L. K., & Webster, J. (1992). Flow in computer-mediated communication: Electronic mail and voice mail evaluation and impacts. *Communication Research*, 19(5), 539–573. <https://doi.org/10.1177/009365092019005001>
- Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In *Environnement Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 391–402). Strasbourg.
- Turner, M., Kitchenham, B., Brereton, P., Charters, S., & Budgen, D. (2010). Does the technology acceptance model predict actual use? A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 52(5), 463–479. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.11.005>
- Ucar, E., Ustunel, H., Civelek, T., & Umut, I. (2017). Effects of using a force feedback haptic augmented simulation on the attitudes of the gifted students towards studying chemical bonds in virtual reality environment. *Behaviour and Information Technology*, 36(5), 540–547. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2016.1264483>
- Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M. C., Bastos, R., Steed, A., Slater, M., & Brooks, F. P. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '99* (pp. 359–364). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/311535.311589>
- Valléry, G., & Leduc, S. (2016). Pratiques d'encadrement et usages des TIC : un exemple en Gendarmerie nationale. *Psychologie Du Travail et Des Organisations*, 22(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.002>
- Valléry, Gérard. (2004). Relations de service et approche ergonomique : saisir le caractère dynamique et situé de l'activité au travers de l'analyse des interactions

- « agent-client ». *Activites*, 01(2), 1–2. <https://doi.org/10.4000/activites.1262>
- Van der Heijden, H. (2004). User Acceptance of Hedonic Information Systems. *MIS Quarterly*, 28(4), 695–704.
- van der Land, S., Schouten, A. P., Feldberg, F., van den Hooff, B., & Huysman, M. (2013). Lost in space? Cognitive fit and cognitive load in 3D virtual environments. *Computers in Human Behavior*, 29(3), 1054–1064. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.09.006>
- Van Schaik, P., & Ling, J. (2011). An integrated model of interaction experience for information retrieval in a Web-based encyclopaedia. *Interacting with Computers*, 23(1), 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2010.07.002>
- Venkatesh, V. (1999). Creation of favorable user perceptions: exploring the role of intrinsic motivation. *Mis Q.*, 23(2), 239–260. <https://doi.org/10.2307/249753>
- Venkatesh, V. (2000). Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Control, Intrinsic Motivation, and Emotion into the Technology Acceptance Model. *Information Systems Research*, 11(4), 342–365. <https://doi.org/10.1287/isre.11.4.342.11872>
- Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology Acceptance Model 3 and a research Agenda on interventions. *Decision Sciences*, 39(2), 273–315. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x>
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A theoretical extension of the Technology Acceptance Model: four longitudinal field studies. *Management Science*, 46(2), 186–204. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>
- Venkatesh, V., & Morris, M. G. (2000). Why Don't Men Ever Stop to Ask for Directions? Gender, Social Influence, and Their Role in Technology Acceptance and Usage Behavior. *MIS Quarterly*, 24(1), 115. <https://doi.org/10.2307/3250981>
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
- Venkatesh, V., Thong, J., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. *MIS Quarterly*, 36(1), 157–178.
- Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière : Vers la prise en compte du travail d'équipement. *Revue d'anthropologie Des Connaissances*, 3(1), 51–72.
- von Mammen, S., Knotte, A., & Edenhofer, S. (2016). Cyber sick but still having fun. In *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology - VRST '16* (pp. 325–326). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2993369.2996349>
- Vygotski, L. (1930). La méthode instrumentale en psychologie. In B. Schneuwly & J.-P. Bronckart (Eds.), *Vygotski aujourd'hui* (pp. 39–48). Paris: Delachaux et Niestlé.
- Vygotski, L. (1997). *Pensée et langage*. Paris: La Dispute.
- Wang, G., & Suh, A. (2019). User adaptation to cybersickness in virtual reality: A qualitative study. In *Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS)* (pp. 1–15). Stockholm, Suède. En ligne https://aisel.aisnet.org/ecis2019_rp/191

- Webster, J., Trevino, L. K., & Ryan, L. (1993). The dimensionality and correlates of flow in human-computer interactions. *Computers in Human Behavior*, 9(4), 411–426. [https://doi.org/10.1016/0747-5632\(93\)90032-N](https://doi.org/10.1016/0747-5632(93)90032-N)
- Weibel, D., Wissmath, B., Habegger, S., Steiner, Y., & Groner, R. (2008). Playing online games against computer- vs. human-controlled opponents: Effects on presence, flow, and enjoyment. *Computers in Human Behavior*, 24(5), 2274–2291. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2007.11.002>
- Williams, M. D., Rana, N. P., & Dwivedi, Y. K. (2015). The unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT): a literature review. *Journal of Enterprise Information Management*. <https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2014-0088>
- Williams, M., Rana, N., Dwivedi, Y., & Lal, B. (2011). Is UTAUT Really Used or Just Cited For The Sake Of It? A Systematic Review of Citations Of UTAUT'S Originating Article. *European Conference on Information Systems (ECIS)*, 1–13. En ligne <http://aisel.aisnet.org/ecis2011/231>
- Wilson, B., & Henseler, J. (2007). Modeling Reflective Higher-Order Constructs using Three Approaches with PLS Path Modeling: A Monte Carlo Comparison. *Conference Proceedings ANZMAC 2007*, 791–800. <https://doi.org/10.1063/1.3033202>
- Witmer, B. G., Jerome, C. J., & Singer, M. J. (2005). The Factor Structure of the Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3), 298–312. <https://doi.org/10.1162/105474605323384654>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Wolfartsberger, J. (2019). Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. *Automation in Construction*, 104, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018>
- Wong Sarver, N., Beidel, D. C., & Spitalnick, J. S. (2014). The Feasibility and Acceptability of Virtual Environments in the Treatment of Childhood Social Anxiety Disorder. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 43(1), 63–73. <https://doi.org/10.1080/15374416.2013.843461>
- Yeh, S.-C., & Lin, P.-H. (2019). How Motion-Control Influences a VR-Supported Technology for Mental Rotation Learning: From the Perspectives of Playfulness, Gender Difference and Technology Acceptance Model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(18), 1736–1746. <https://doi.org/10.1080/10447318.2019.1571784>
- Yousafzai, S. Y., Foxall, G. R., & Pallister, J. G. (2007a). Technology acceptance: a meta- analysis of the TAM: Part 1. *Journal of Modelling in Management*, 2(3), 251–280. <https://doi.org/10.1108/17465660710834453>
- Yousafzai, S. Y., Foxall, G. R., & Pallister, J. G. (2007b). Technology acceptance: a meta- analysis of the TAM: Part 2. *Journal of Modelling in Management*, 2(3), 281–304. <https://doi.org/10.1108/17465660710834462>
- Zhao, Z. X. (2002). Virtual reality technology: An overview. *Journal of Southeast University*, 32(2A), 1–10.

ANNEXES

ANNEXE 1 : GUIDE D'ENTRETIEN POUR LES UTILISATEURS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

Thèmes	Éléments à aborder
Informations générales sur la personne interrogée	Parcours, poste actuel, ancienneté, rôle dans le projet
Outils habituellement utilisés dans les projets de conception	Formation, réalisations
Expérience antérieure avec la réalité virtuelle	Description de l'utilisation, des dispositifs utilisés et du contexte
Perceptions sur l'utilisation de la réalité virtuelle	Prise en main, utilisation, difficultés, mal des environnements virtuels
Utilité de la réalité virtuelle pour le projet	Objectifs initiaux, apports, limites
Comparaison avec la CAO	Similitudes et différences, apports et limites
Intégration de la réalité virtuelle dans le projet de conception	Intérêts pour le projet, changement dans l'activité
Intentions d'utiliser	Intention d'utiliser à nouveau, intention de ne pas utiliser à nouveau

ANNEXE 2 : GRILLE DE CODAGE DES COMMUNICATIONS LORS DES SESSIONS EN RÉALITÉ VIRTUELLE

Code	Description	Exemple
Autres		
Annonce une action	Annonce une action aux autres utilisateurs	<i>On va se remettre sur le mur d'en face.</i>
But	Exprime un but	<i>Là j'essaie un peu de me rendre compte des hauteurs de travail.</i>
Proposition	Propose de faire quelque chose	<i>Je peux mettre une chaise si tu veux te donner une idée.</i>
Question but	Pose une question sur le but d'un autre utilisateur	<i>Donc là t'essaies de faire quoi ?</i>
Partage d'un point de vue		
Point de vue	Décrit / explique / fait état ce qu'il voit	<i>Oui, ça va, c'est... Je vois qu'une seule image.</i>
Question point de vue	Demande à un autre utilisateur s'il voit la même chose / ce qu'il voit	<i>Je ne sais pas si vous voyez.</i>
Références au monde physique		
Monde physique	Donne des informations sur les caractéristiques physiques (taille, poids, localisation...) d'un élément de l'environnement virtuel	<i>Ils sont à quatre-vingts centimètres de hauteur.</i>
Question monde physique	Pose une question sur les caractéristiques physiques (taille, poids, localisation...) d'un élément de l'environnement virtuel	<i>Combien de haut les chariots ?</i>

Code	Description	Exemple
Revue de projet		
Contrainte	Explique une contrainte de conception	<i>Mais de toute façon on le savait qu'il n'y aurait pas beaucoup de passage. On est, on est limité dans le POS [Plan d'Occupation des Sols].</i>
Demande évaluation	Demande une évaluation sur une solution	<i>T'as vu des choses qui te dérangent, (compagnon 1) ?</i>
Écart entre environnement virtuel et projet	Décrit des écarts entre l'environnement virtuel et le projet actuel	<i>Parce que dans le cahier des charges, il n'y a pas tout le portique bleu foncé qu'on voit là.</i>
Évaluation du poste	Évalue (positivement ou négativement) un aspect du poste	<i>Oui, ici il n'y a vraiment pas assez de place.</i>
Évaluation d'une solution	Évalue (positivement ou négativement) une solution proposée	<i>Regarde là ici, vous savez les mettre [les poteaux] là en dessous pour justement protéger le passage. Ah non, à côté il y a le boîtier électrique.</i>
Future tâche	Donne des informations sur les futures tâches à réaliser sur le poste	<i>Alors après il faut imaginer que du coup ils ont rien à faire [pas d'opérations à réaliser] en façade.</i>
Proposition de solution	Propose une solution face à un problème	<i>Bah je pense qu'il va falloir mettre des protections.</i>
Question future tâche	Pose une question sur les futures tâches à réaliser sur le poste	<i>Du coup ça prend là au-dessus là ? Tu utilises le pont ?</i>
Repousse une décision	Repousse une décision à plus tard	<i>Ah ça les cadres c'est encore en cours de discussion. Il n'y a rien de... Il n'y a rien de figé encore.</i>

Code	Description	Exemple
Utilisation de la technologie		
Commentaire	Fait un commentaire sur la technologie / son utilisation	<i>C'est vachement bien quand même.</i>
Construction de la maquette	Donne des informations sur la construction de la maquette	<i>Tant que je ne travaille pas dans le CAVE je ne peux pas le [le mannequin] mettre là, pile là où il est. Comme les outils, je les ai posés un peu n'importe où dans la scène.</i>
Dysfonctionnement - difficultés de manipulation	Fait état d'un dysfonctionnement, de difficultés de manipulation	<i>Elles [les lunettes] se synchronisent pas celles-là.</i>
Explications difficultés de manipulation	Explique la potentielle cause d'une difficulté de manipulation	<i>T'es peut-être un peu trop bas.</i>
Explications générales - sur une fonctionnalité	Explique le fonctionnement général de la RV/du CAVE ou une fonctionnalité	<i>Là pour l'instant elle [une perceuse] n'est pas ce qu'on appelle physicalisée, donc tu peux la faire taper dans ce que tu veux... il n'y aura aucun problème. Tu peux aller dans le bâti avec, elle va même pas taper, elle va peut-être même passer à travers.</i>
Injonction	Demande à un autre utilisateur de faire une action donnée	<i>Après tends ton bras voir ce qu'il se passe.</i>
Instructions pour manipulation	Indique comment effectuer une manipulation	<i>Pour être à hauteur comme il faut il faut mettre avec les pieds [un mode du logiciel], parce que là on est en mode papillon, en fait, oiseau [un autre mode du logiciel].</i>
Mal des EV	Fait référence au mal des environnements virtuels	<i>Il y a encore personne qui a demandé un sac.</i>
Question manipulation	Pose une question sur la manière dont effectuer une manipulation	<i>Et pour prendre une mesure par rapport à là où je suis ?</i>

Code	Description	Exemple
Question RV ou fonctionnalité	Pose une question sur le fonctionnement de la RV / d'une fonctionnalité	<i>Et ça avec la simu... Est-ce qu'on pourra représenter une main et l'attraper ? Ou pas ?</i>
Référence EV	Fait référence à un élément de l'environnement virtuel	<i>C'est ici. Le point le plus haut, voilà il est là.</i>

ANNEXE 3 : GUIDE D'ENTRETIEN POUR LES NON-UTILISATEURS

Thèmes	Éléments à aborder
Informations générales sur la personne interrogée	Parcours, poste actuel, ancienneté
Outils utilisés aujourd'hui	Outils utilisés, formation à ces outils, exemples de réalisations
Déroulement des projets	Exemple d'un projet, rôle, collaborations
Expérience avec la réalité virtuelle	Expériences antérieures personnelles et professionnelles
Apports envisagés	Apports dans le travail, dans le projet
Utilisation de la réalité virtuelle	À quoi ressemblerait l'utilisation ? Utilisée avec qui ? Pour quelles raisons ?
Utilité de la réalité virtuelle	Type de projet, aspects à traiter, exemples Types de projet où la réalité virtuelle n'est <u>pas</u> utile
Communication autour de la réalité virtuelle dans l'entreprise	Utilisation de la réalité virtuelle dans l'entreprise, opinions de la personne interrogée
Avantages	Avantages dans le travail
Inconvénients	Inconvénients dans le travail
Changements imaginés dans l'activité	Changements imaginés dans l'activité
Attitudes générales sur la réalité virtuelle	De manière générale, comment la personne interrogée perçoit la réalité virtuelle

ANNEXE 4 : GUIDE D'ENTRETIEN POUR LES CHARGÉS DE RÉALITÉ VIRTUELLE

Thèmes	Éléments à aborder
Informations générales sur la personne interrogée	Parcours, poste actuel, ancienneté
Fonctionnement de la réalité virtuelle dans l'entreprise	Demande de sessions en RV, rôle dans les projets de conception, fonctionnement des logiciels de réalité virtuelle, fonctionnement de la création des scénarios
Intégration dans les projets de conception	Rôle dans les sessions en réalité virtuelle
Expérience des outils 3D et de la réalité virtuelle	Formation aux logiciels CAO et de réalité virtuelle, réalisations
Expériences antérieures avec la réalité virtuelle dans des projets de conception	Description d'expériences antérieures Description de projets où elle a été utile Description de projets où elle a été inutile
Communication autour de la réalité virtuelle	Actions de communication par les chargés de réalité virtuelle et le service R&T
Utilité de la réalité virtuelle	Objectifs de l'utilisation de la réalité virtuelle Intérêts pour les projets Bénéfices apportés
Facilité d'utilisation	Pour les chargés de réalité virtuelle Pour les utilisateurs lors des sessions
Pré-requis à l'utilisation de la réalité virtuelle	Pour les chargés de réalité virtuelle Pour les demandeurs
Freins à l'utilisation de la réalité virtuelle	Selon les chargés de réalité virtuelle
