



**HAL**  
open science

# Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif.

Katy Tcha-Tokey

► **To cite this version:**

Katy Tcha-Tokey. Conception et évaluation de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif.. Informatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2018. Français. NNT : 2018ENAM0012 . tel-01771595

**HAL Id: tel-01771595**

**<https://pastel.hal.science/tel-01771595v1>**

Submitted on 19 Apr 2018

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

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

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

## Doctorat ParisTech

# THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité " Ergonomie et informatique "**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Katy TCHA-TOKEY**

le 12 mars 2018

## **Conception et Evaluation de l'Expérience Utilisateur en Environnement Virtual Immersif**

Directeur de thèse : **Simon RICHIR**

Co-encadrement de la thèse : **Emilie LOUP-ESCANDE et Olivier CHRISTMANN**

### Jury

**M. Jean-Pierre JESSEL**, Professeur des universités, Université Toulouse III

**M. Cédric BUCHE**, Professeur des universités, École Nationale d'Ingénieurs de Brest

**M. Jean-Claude SAGOT**, Professeur des universités, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

**M. Olivier CHRISTMANN**, Maître de conférences, Arts et Métiers Paris Tech

**M. Sylvain HAUDEGOND**, Chercheur, Serre Numérique, Université de Valenciennes

**Mme Emilie LOUP-ESCANDE**, Maître de conférences, Université de Picardie Jules Verne

**M. Simon RICHIR**, Professeur des universités, Arts et Métiers ParisTech

Président du jury

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

T  
H  
È  
S  
E



# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier dans un premier temps Simon Richir, Emilie Loup-Escande et Olivier Christmann de m'avoir accompagné tout au long de cette thèse. Merci à tous, tout d'abord, pour votre accompagnement de qualité mais aussi pour vos multiples relectures et conseils rigoureux quant à la formalisation des articles scientifiques, du manuscrit de thèse et de la conception des protocoles expérimentaux. Merci à Simon de m'avoir accueillie dans son équipe et de m'avoir fait confiance en me confiant un sujet de thèse aussi fondamental pour les projets de recherche de l'équipe. Merci à Emilie pour ses mots d'encouragement qui m'ont soutenu à chaque étape cruciale de la thèse. Merci à Olivier pour son attention bienveillante qui a su me rassurer également durant les étapes cruciales de cette thèse.

Je tiens à remercier Jean-claude Sagot et Cédric Buche d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi que Jean-Pierre Jessel et Sylvain Haudegond de l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'être membres du jury.

Je remercie l'entreprise EON reality de m'avoir fourni un terrain d'expérimentation, pour le troisième et dernier objectif primordial de cette thèse. Merci aux membres de l'entreprise pour leur disponibilité et de m'avoir facilité les expérimentations en s'occupant notamment du matériel. Merci à tous les participants des expérimentations sans qui ces travaux n'auraient pu aboutir.

J'exprime ma reconnaissance à Laval Agglomération et au département de la Mayenne qui ont financé ce travail de recherche.

Merci à tous les membres de l'équipe des Arts et Métiers ParisTech de Laval et d'Angers. Un merci tout particulier à Marie, Adrien, Samory, Clément, Geoffrey, Majid, Benjamin, Thibaud et Jean-Michel pour les moments partagés, débattus, de crise ou de joie autour des réunions et séminaires PI.

Merci également à Thomas Cribier, Antoine Tetart, Sandrine Trouillard, Audrey Lecomte et à tous leurs collègues de m'avoir accompagné et de s'être intéressés à mon projet d'entreprise.

Merci à mes parents, mes frères et soeurs et amis. Merci pour la curiosité et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail malgré la distance et qui m'a apporté beaucoup de joie, merci à mes parents pour l'exemple de force et ténacité qu'ils m'ont démontré et qui a contribué à ce que je me lance et à ce que je finisse ce travail. Merci à Victor de m'avoir accompagné et épaulé dans les moments difficiles de cette thèse. Merci à Fanny et Thierry de m'avoir généreusement accueilli dans un cadre propice à la rédaction de mon manuscrit.

Merci à Aurélie, Isabelle, Ihsane, Eugènia, Helena, Rose-Lys et Fanny pour les conversations sur ma thèse ou autre qui m'ont permis bien souvent de relativiser.

Merci aux demi-fondeuses du club Lavallois pour les moments sportifs mais pleins de joie qui m'ont permis de retrouver mon énergie chaque semaine de l'année 2017 pour me relancer dans ma thèse. Un merci tout particulier à Josiane pour son accueil chaleureux dans ce club.

Merci à tous ceux que je n'ai pas cités et qui ont directement ou indirectement contribué à ce que mon projet de thèse aboutisse.



*À mon papa*



# TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>13</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b>	<b>15</b>
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>17</b>
<b>ACRONYME</b>	<b>19</b>
<b>CHAPITRE I. INTRODUCTION, PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE DE RECHERCHE</b>	<b>21</b>
1. Introduction	23
2. Problématique et démarche de recherche	27
2.1 Objectifs et problématiques	27
2.2 Démarche de recherche	28
2.3 Approche expérimentale	29
2.3.1 Expérimentations en laboratoire	29
2.3.2 Expérimentation en entreprise	30
2.4 Structuration des chapitres	31
2.5 Analyses statistiques pour le traitement des données	31
2.6 Synthèse de la démarche de recherche	33
<b>CHAPITRE II. EXPERIENCE UTILISATEUR EN INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF</b>	<b>35</b>
1. Introduction	37
2. Éléments de définition de l'expérience utilisateur	37
2.1 Expérience utilisateur d'après l'Organisation Internationale de la Standardisation	37
2.2 Expérience utilisateur en marketing	38
2.3 Expérience utilisateur en architecture de l'information	38
2.4 Expérience utilisateur en ergonomie des Interactions Homme-Machine	39
2.5 Expérience utilisateur dans les environnements virtuels	40
3. L'expérience utilisateur : facteurs, composants et modèles	40
3.2 Composants de l'expérience utilisateur	43
3.3 Modèles de l'expérience utilisateur	50
3.3.1 Modèles de l'expérience utilisateur centrés produit	50
3.3.2 Modèles de l'expérience utilisateur centrés utilisateur	52
3.4 Synthèse des composants de modèles de l'UX	56
4. Expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif : facteurs, composants et modèles	62
4.1 Facteurs d'influence en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif	62
4.2 Composants de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif	63
4.3 Modèles de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif	65

4.3.1	Modèle de l'expérience utilisateur influencée par les caractéristiques de l'environnement virtuel	65
4.3.2	Expérience utilisateur inspirée des modèles de l'acceptabilité	67
4.3.3	Expérience utilisateur fondée sur le flow	68
4.4	Synthèse des composants de modèles de l'UX en EVI	69
<b>5.</b>	<b>Expérience utilisateur en interaction homme-environnement virtuel immersif : outils d'évaluation</b>	<b>72</b>
5.1	Évaluation de l'expérience utilisateur relative à l'utilisation de technologies traditionnelles	72
5.1.1	Étude de Hassenzahl sur l'expérience utilisateur de sept logiciels et trois types d'écrans d'ordinateur	73
5.1.2	Étude de Mahlke sur l'expérience utilisateur de trois types de lecteurs audio portables	73
5.1.3	Étude de Wu et al. sur la qualité de l'expérience d'un espace interactif et collaboratif	75
5.1.4	Étude de Takatalo et al. sur l'expérience utilisateur de deux jeux vidéo	75
5.1.5	Tableau récapitulatif des études empiriques sur l'expérience utilisateur	76
5.2	Évaluation de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif	79
5.2.1	Étude de Lin et Parker sur l'expérience utilisateur d'un cave à trois murs de projection	79
5.2.2	Étude de Shin et al. sur l'expérience virtuelle d'une salle de classe virtuelle	79
5.2.3	Étude de cheng et al. sur l'expérience utilisateur d'un simulateur de conduite virtuelle	80
5.2.4	Tableau récapitulatif des études empiriques de l'expérience utilisateur relative aux Environnements Virtuels Immersifs	81
<b>6.</b>	<b>Conclusion de l'état de l'art</b>	<b>84</b>
<b>CHAPITRE III. PROPOSITION D'UN MODELE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF</b>		<b>87</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>88</b>
<b>2.</b>	<b>Vers un modèle de l'expérience utilisateur en interaction homme-environnement virtuel immersif</b>	<b>88</b>
2.1	Le modèle d'expérience utilisateur adapté aux environnements virtuels immersifs	89
2.2	Les composants clés du modèle IVEM	90
2.2.1	Le flow : état subjectif optimal	90
2.2.2	L'émotion : résultat de l'évaluation cognitive de l'Environnement Virtuel Immersif	91
2.2.3	Les compétences : à l'intersection de l'individu et de la situation	93
2.2.4	L'utilisabilité : aspect instrumental et pragmatique de l'expérience utilisateur	94
2.2.5	La présence virtuelle ou téléprésence : expérience psychologique	94
2.2.6	L'immersion : expérience sensorielle	95
2.2.7	L'engagement : réponse volontaire et contrôle	96
2.2.8	Les conséquences de l'expérience : théorie du conflit visuo-vestibulaire	97
2.2.9	L'adoption de la technologie	98
2.2.10	Le jugement global	99
2.3	L'interdépendance des composants du modèle IVEM	99
2.3.1	Présence, flow et conséquences de l'expérience	99
2.3.2	Présence, immersion et engagement	99
2.3.3	Flow, utilisabilité, compétence et émotion	100
2.3.4	Conséquences de l'expérience, jugement et adoption de la technologie	100
2.4	L'impact des facteurs d'influence sur les composants du modèle IVEM	100
2.4.1	L'impact des caractéristiques de l'environnement virtuel immersif sur l'expérience utilisateur	101
2.4.2	L'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur l'expérience utilisateur	101
<b>3.</b>	<b>Conclusion : synthèse des composants clés et facteurs d'influence</b>	<b>102</b>
<b>CHAPITRE IV. PROPOSITION D'UN QUESTIONNAIRE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF</b>		<b>107</b>

<b>1. Introduction</b>	<b>109</b>
<b>2. Questionnaires référencés mesurant les composants de l'expérience utilisateur</b>	<b>109</b>
2.1 Questionnaire de présence, engagement et immersion	109
2.2 Questionnaire de flow	109
2.3 Questionnaire de compétences	110
2.4 Questionnaire d'émotion	110
2.5 Questionnaire d'utilisabilité	110
2.6 Questionnaire d'adoption de la technologie	110
2.7 Questionnaire de jugement	111
2.8 Questionnaire de conséquence de l'expérience	111
2.9 Synthèse des Questionnaires	111
<b>3. Conclusion : construction d'un questionnaire d'expérience utilisateur opérationnalisant le modèle</b>	<b>113</b>

## **CHAPITRE V. VALIDATION D'UN QUESTIONNAIRE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF**

<b>1. Introduction</b>	<b>119</b>
<b>2. Validation du questionnaire : étude expérimentale</b>	<b>119</b>
2.1 Objectif et hypothèses	119
2.2 Participants	119
2.3 Procédure	120
2.4 Tâches réalisées	121
2.5 Matériels et mesure	122
2.5.1 L'Environnement Virtuel Immersif	122
2.5.2 Questionnaire d'identification	124
2.5.3 Questionnaire d'UX IVEQ	125
2.6 Données collectées et analyse : validation du questionnaire d'UX IVEQ	126
2.6.1 Propriétés psychométriques	126
2.6.2 Fiabilité	126
2.6.3 Sensibilité	126
2.7 Résultats : validation du questionnaire d'UX IVEQ	127
2.7.1 Fiabilité	127
2.7.2 Sensibilité	129
2.7.3 Questionnaire IVEQ validé	131
<b>3. Discussion de l'étude</b>	<b>131</b>
<b>4. Limites de l'étude</b>	<b>132</b>
<b>5. Conclusion et perspective</b>	<b>133</b>

## **CHAPITRE VI. VALIDATION D'UN MODELE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF**

<b>1. Introduction : conception de l'étude</b>	<b>137</b>
<b>2. Expérimentation 1 : effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective</b>	<b>138</b>
2.1 Objectif et hypothèses	138
2.6 Participants	138

2.7	Procédure	138
2.8	Tâches réalisées	138
2.9	Matériel et mesures	139
2.9.1	Environnement virtuel, questionnaire d'identification et questionnaire d'UX	139
2.9.2	Mesures d'utilisabilité objective	139
2.10	Données collectées et analyse	139
2.10.1	Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective	139
2.10.2	Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective	139
2.11	Résultats	140
2.11.1	Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective	140
2.11.2	Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective	140
<b>3.</b>	<b>Expérimentation 2 : effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective</b>	<b>141</b>
3.1	Objectif et hypothèses	141
3.2	Participants	141
3.3	Procédure	142
3.4	Tâches réalisées	142
3.5	Matériels et mesures	142
3.6	Données collectées et analyse	142
3.6.1	Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective	142
3.6.2	Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective	142
3.7	Résultats	143
3.7.1	Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective	143
3.7.2	Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective	143
<b>4.</b>	<b>Expérimentation 3 : effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective</b>	<b>144</b>
4.1	Objectif et hypothèses	144
4.2	Participants	145
4.3	Procédure	145
4.4	Tâches réalisées	145
4.5	Matériel et mesures	145
4.6	Données collectées et analyse	145
4.6.1	Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective	145
4.6.2	Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective	146
4.7	Résultats	146
4.7.1	Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective	146
4.7.2	Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective	147
<b>5.</b>	<b>Expérimentation 4 : effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective</b>	<b>147</b>
5.1	Objectif et hypothèses	147
5.2	Participants	148
5.3	Procédure	148
5.4	Tâches réalisées	148
5.5	Matériel et mesures	148
5.6	Données collectées et analyse	148
5.6.1	Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective	148
5.6.2	Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective	149
5.7	Résultats	149
5.7.1	Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective	149
5.7.2	Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective	150
<b>6.</b>	<b>Expérimentation 5 : effet de l'expérience précédente sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective</b>	<b>150</b>
6.1	Objectif et hypothèses	150

6.2	Participants	151
6.3	Procédure	152
6.4	Tâches réalisées	152
6.5	Matériel et mesures	152
6.6	Données collectées et analyse	152
6.6.1	Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'UX subjective	152
6.6.2	Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective	152
6.7	Résultats	153
6.7.1	Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'UX subjective	153
6.7.2	Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective	154
<b>7.</b>	<b>Résultats généraux : validation de l'interdépendance des composants du modèle d'UX IVEM</b>	<b>155</b>
7.1	Introduction et hypothèses	155
7.2	Données collectées et analyse	156
7.2.1	Mesure de l'UX subjective	156
7.2.2	Mesure d'utilisabilité objective	156
7.2.3	Modélisation par équation structurelle	157
7.3	Résultats : validation de l'interdépendance des composants du modèle d'UX IVEM	158
7.3.1	Mesure de l'UX subjective	158
7.3.2	Mesure d'utilisabilité objective	158
7.3.3	Modélisation par équation structurelle	159
<b>8.</b>	<b>Discussion de l'étude</b>	<b>165</b>
<b>9.</b>	<b>Limites de l'étude</b>	<b>170</b>
<b>10.</b>	<b>Conclusion et perspective</b>	<b>171</b>
 <b>CHAPITRE VII. APPLICATION DU QUESTIONNAIRE POUR L'EVALUATION DE DEUX PERIPHERIQUES IMMERSIFS</b>		<b>174</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>176</b>
<b>2.</b>	<b>Objectif de l'étude et hypothèses</b>	<b>177</b>
<b>3.</b>	<b>Participants</b>	<b>178</b>
<b>4.</b>	<b>Procédure</b>	<b>178</b>
<b>5.</b>	<b>Tâches réalisées</b>	<b>179</b>
<b>6.</b>	<b>Matériel et mesures</b>	<b>180</b>
6.1	Application ludo-éducative King Tut VR 2	180
6.2	Périphériques immersifs	181
6.3	Questionnaire d'identification	182
6.4	Questionnaire d'UX	183
6.5	Test de connaissances	183
<b>7.</b>	<b>Données collectées et analyse</b>	<b>183</b>
7.1	Comparaison de l'UX subjective entre le casque de RV et le CAVE	183
7.2	Temps de réalisation de la tâche avec le casque de RV et le CAVE	184
7.3	Test de connaissance pré- et post-passation	184
<b>8.</b>	<b>Résultats</b>	<b>184</b>
8.1	Comparaison de l'UX subjective entre le casque de RV et le CAVE	185

8.2	Temps de réalisation de la tâche avec le casque de RV et le CAVE	186
8.3	Test de connaissances pré- et post-passation	186
<b>9.</b>	<b>Discussion</b>	<b>187</b>
<b>10.</b>	<b>Limites de l'étude</b>	<b>188</b>
<b>11.</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>189</b>
 <b>CHAPITRE VIII. DISCUSSION GENERALE : VERS UN MODELE HOLISTIQUE D'AIDE A LA CONCEPTION</b>		 <b>192</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>194</b>
<b>2.</b>	<b>Rappel et discussion des principaux concepts</b>	<b>194</b>
<b>3.</b>	<b>Discussion des résultats : de la validation à l'application du modèle et du questionnaire d'UX</b>	<b>196</b>
3.1	Validation d'un modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif	197
3.1.1	Principaux résultats de la validation du modèle IVEM	197
3.1.2	L'interdépendance des composants du modèle IVEM	197
3.1.3	L'impact des caractéristiques de l'EVI et de l'utilisateur sur les composants du modèle IVEM	198
3.2	Validation du questionnaire de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif	199
3.2.1	Principaux résultats de la validation du questionnaire IVEQ	199
3.2.2	Propositions d'améliorations du questionnaire IVEQ	200
3.3	Application du questionnaire pour l'évaluation de deux périphériques immersifs	200
3.3.1	Principaux résultats de l'application du questionnaire	200
3.3.2	Vers des recommandations d'amélioration de l'UX des EVI	201
 <b>CONCLUSION GENERALE : APPORTS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE</b>		 <b>204</b>
<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>206</b>
<b>2.</b>	<b>Apport théorique</b>	<b>206</b>
<b>3.</b>	<b>Apport méthodologique</b>	<b>208</b>
<b>4.</b>	<b>Perspectives de recherche</b>	<b>209</b>
4.1.	Elargir la portée de notre modèle et questionnaire de l'UX des EVI	209
4.2.	Vers le développement d'un outil numérique d'aide à la conception	209
<b>5.</b>	<b>Entrepreneuriat</b>	<b>210</b>
 <b>BIBLIOGRAPHIE</b>		 <b>212</b>
 <b>PRODUCTION PERSONNELLE</b>		 <b>234</b>
 <b>PUBLICATIONS</b>		 <b>236</b>
 <b>ANNEXES</b>		 <b>238</b>
 <b>Annexe 1 : Document de droit à l'image</b>		 <b>240</b>

<b>Annexe 2 : Affiche de recrutement</b>	<b>241</b>
<b>Annexe 3 : Questionnaire d'identification</b>	<b>242</b>
<b>Annexe 4 : Exemple de fichiers log de l'utilisateur N° 110</b>	<b>245</b>
<b>Annexe 5 : Coefficient de corrélation de Pearson des 83 items du questionnaire IVEQ</b>	<b>247</b>
<b>Annexe 6 : Questionnaire d'expérience utilisateur</b>	<b>250</b>
<b>Annexe 7 : Indications sur la manette du cave</b>	<b>255</b>
<b>Annexe 8 : Indications sur le casque de RV mobile</b>	<b>256</b>
<b>Annexe 9 : Test de connaissance de l'application King Tut VR2</b>	<b>258</b>



## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Synthèse de notre démarche de recherche.....	33
Figure 2. Modèle de la qualité d'expérience de Alben, 1996 (notre traduction).....	51
Figure 3. Modèle de la qualité d'expérience de Morville, 2004 (notre traduction).....	52
Figure 4. Modèle théorique de l'expérience utilisateur de Hassenzahl, 2001 (notre traduction).....	52
Figure 5. Modèle d'expérience utilisateur de Mahlke, 2008 (notre traduction).....	53
Figure 6. Modèle de la qualité d'expérience de Wu et al., 2009 (notre traduction).....	54
Figure 7. Modèle multidimensionnel de l'expérience utilisateur de Takatalo et al., 2010 (notre traduction).....	55
Figure 8. Modélisations des surfaces de réponses (MSR) de l'expérience utilisateur de Lin & Parker, 2007 (notre traduction).....	67
Figure 9. Modèle d'expérience utilisateur de Shin et al., 2013 (notre traduction).....	68
Figure 10. Modèle d'expérience utilisateur de Cheng et al., 2014 (notre traduction).....	69
Figure 11. Exemple d'une échelle de Likert à 10 points.....	72
Figure 12. Modèle IVEM.....	89
Figure 13. Modèle de flow de Nakamura & Csikszentmihalyi, 2014 (notre traduction).....	91
Figure 14. Modèle circomplexe de l'affect central croisant deux dimensions de Russel et Barrett (1999).....	92
Figure 15. Illustration des compétences à l'intersection de deux entités de Everaere, 2000 (notre traduction).....	93
Figure 16. Salle d'expérimentation.....	121
Figure 17. Capture d'écran de l'EVI Think And Shoot.....	121
Figure 18. Capture d'écran de l'environnement virtuel immersive "Think and Shoot" au premier niveau avec le panneau d'instruction, le plan réduit et une créature de feu.....	122
Figure 19. Valeur du coefficient de l'alpha de Cronbach pour les 10 sous-échelles du questionnaire IVEQ.....	127
Figure 20. Distribution des scores du flow.....	129
Figure 21. Distribution des scores de la présence.....	129
Figure 22. Distribution des scores de l'immersion.....	129
Figure 23. Distribution des scores de l'engagement.....	129
Figure 24. Distribution des scores de compétence.....	130
Figure 25. Distribution des scores d'émotion.....	130
Figure 26. Distribution des scores du Jugement.....	130
Figure 27. Distribution des scores de l'adoption de la technologie.....	130
Figure 28. Distribution des scores des conséquences de l'expérience.....	130
Figure 29. Modèle théorique IVEM et les quatre hypothèses sur l'interdépendance des composants.....	156
Figure 30. Modèle structurel représenté avec les coefficients des pistes causales entre composants.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 31. Représentation du modèle modifié IVEM avec les 7 relations d'origines et les 9 relations ajoutées.....	164
Figure 32. Modèle IVEM final après analyse de l'interdépendance des composants de l'UX et de l'effet de facteurs d'influence sur l'UX.....	170
Figure 33. Participant dans le CAVE (iCube) utilisant l'application King Tut VR2.....	179
Figure 34. Capture d'écran de l'application King Tut VR2 dans le casque de RV mobile.....	180
Figure 35. Capture d'écran de l'application King Tut VR 2 vue sur tablette.....	180
Figure 36. Casque de RV mobile VRONE.....	181
Figure 37. Manette pour l'iCube avec les marqueurs réfléchissants.....	182
Figure 38. CAVE EON iCube à quatre murs de projection.....	182

Figure 39. Résumé de l'impact des facteurs d'influence sur l'UX subjective (gauche) et l'utilisabilité objective (droite).....	202
Figure 40. Modèle IVEM final.....	207

# TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Facteurs d'influence caractéristiques du système et de l'utilisateur d'après la norme ISO 9241-210, 2009 (notre traduction).....	42
Tableau 2. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Alben, 1996 (notre traduction)..	42
Tableau 3. Facteurs d'influence caractéristiques du système, de l'utilisateur et du contexte d'après Mahlke, 2008, Hassenzahl et Tractinsky, 2006, Arhippainen et Tähti, 2003 (notre traduction).....	43
Tableau 4. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Wu et al., 2009 (notre traduction) .....	43
Tableau 5. Composants de l'UX d'après la norme ISO 9241-210, 2009 (notre traduction).....	44
Tableau 6. Six composants de la qualité de l'expérience d'après Alben, 1996 (notre traduction) .....	45
Tableau 7. Recommandations pour une bonne expérience utilisateur des sites internet d'après Morville, 2004 (notre traduction) .....	46
Tableau 8. Cinq composants de l'expérience utilisateur d'après Hassenzahl, 2001 (notre traduction)	46
Tableau 9. Cinq composants de l'expérience utilisateur d'après Mahlke, 2008 (notre traduction) .....	47
Tableau 10. Six composants de l'expérience utilisateur d'après Wu et al., 2009 (notre traduction) .....	48
Tableau 11. Trois composants et quinze sous-composants de l'expérience utilisateur d'après Takatalo et al., 2010 (notre traduction).....	49
Tableau 12. Six composants de l'expérience utilisateur d'après Loup-Escande & Lécuyer, 2014 (notre traduction) .....	50
Tableau 13. Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX.....	57
Tableau 14. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Lin et Parker, 2007 (notre traduction) .....	62
Tableau 15. Facteur d'influence caractéristique de l'utilisateur d'après Shin et al., 2013 (notre traduction) .....	63
Tableau 16. Facteurs d'influence caractéristiques du système et de l'utilisateur d'après Cheng et al., 2014 (notre traduction).....	63
Tableau 17. Sept composants de l'expérience utilisateur d'après Lin & Parker, 2007 (note traduction) .....	64
Tableau 18. Huit composants de l'expérience utilisateur d'après Shin et al., 2013 (notre traduction)...	64
Tableau 19. Sept composants de l'expérience utilisateur d'après Cheng et al., 2009 (notre traduction)	65
Tableau 20. Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX.....	70
Tableau 21. Exemple d'une métrique subjective et objective du composant « utilisabilité ». .....	72
Tableau 22. Composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif traditionnel utilisé, nature des composants et méthode d'évaluation .....	77
Tableau 23. Composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif immersif utilisé, nature des composants et méthode d'évaluation .....	82
Tableau 24. Composants des modèles source, de notre modèle et études sources identifiées pour la proposition de notre modèle IVEM.....	103
Tableau 25. Facteurs d'influence des modèles sources, de notre modèle et études sources identifiées pour la proposition de notre modèle IVEM .....	105
Tableau 26. Composants, questionnaires et sous-échelles identifiés pour mesurer l'UX .....	112
Tableau 27. Items sélectionnés à partir des questionnaires de composants de l'UX originaux et constituant notre propre questionnaire d'UX pour les EVI.....	114
Tableau 28. Résultats de l'alpha de Cronbach pour les sous-échelles du questionnaire IVEQ....	128
Tableau 29. Moyenne, écart type, variance, valeur d'asymétrie, coefficient du test de Kolmogorov-Smirnov et p des scores des sous-échelles du questionnaire IVEQ .....	131

Tableau 30. Liste des cinq expérimentations conduites dans l'étude 1 .....	137
Tableau 31. Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective : moyenne, écart type et valeur de t des scores pour l'expérimentation 1.....	140
Tableau 32. Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 1 .....	141
Tableau 33. Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective : moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 2 .....	143
Tableau 34. Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 2 .....	144
Tableau 35. Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 3 .....	146
Tableau 36. Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 3 .....	147
Tableau 37. Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 4.....	149
Tableau 38. Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 4 .....	150
Tableau 39. Effet de l'expérience précédente sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 5 .....	153
Tableau 40. Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 5.....	154
Tableau 41. Valeurs recommandées d'indices de l'ajustement pour une Modélisation par Equation Structurelle .....	158
Tableau 42. Mesure de l'UX subjective : moyenne et écart type des composants des dix composants de l'UX subjective .....	158
Tableau 43. Mesures d'utilisabilité objective : moyenne et écart type du niveau atteint, du score total, du temps de réalisation de la tâche et du nombre d'erreurs.....	159
Tableau 44. Résultat de l'analyse du modèle structurel avec les pistes causales retenues et rejetées .....	161
Tableau 45. 16 pistes causales statistiquement significatives du modèle modifié.....	162
Tableau 46. Indices de qualité d'ajustement pour le modèle structurel et le modèle modifié....	165
Tableau 47. Moyenne, écart type, valeur de t et p des composants l'UX subjective pour le casque de RV et le CAVE .....	185
Tableau 48. Moyenne et écart-type du temps de réalisation de la tâche dans le scénario King Tut VR2 pour le CAVE et le casque de RV mobile .....	186
Tableau 49. Nombre total de réponses correctes, moyenne et écart-type des scores obtenus au test de connaissances pré- et post-passation sur Howard Carter et la découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon.....	186

# GLOSSAIRE

Branding : discipline qui consiste à gérer les marques des entreprises et l'image de leur marque, dans le domaine du marketing.

Capteur Electro-Encéphalographique : méthode d'exploration cérébrale qui mesure l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu.

Cardboard : casque de réalité virtuelle fonctionnant à l'aide d'un smartphone compatible.

Casque de réalité virtuelle : dispositif formé de deux écrans qui donnent à l'utilisateur la possibilité d'observer la scène virtuelle qui lui est présentée, de manière naturelle avec ses mouvements de tête, en stéréoscopie.

CAVE (ou Cube immersif 3D) : salle de visualisation 3D munie de 3 à 6 murs de projection. Plusieurs utilisateurs peuvent se plonger dans le même environnement virtuel en même temps.

Composants : ensemble de dimensions propres à l'interaction entre l'humain et la technologie et qui caractérisent l'expérience utilisateur.

Cybersickness : nom anglophone du mal des environnements virtuels.

Design : vaste discipline (design du web, design industriel, ...) qui consiste à planifier la réalisation et la production d'un objet (produit, interaction, espace, service, ...) ou d'un système.

Dispositif haptique : système tactilo-kinesthésique physique ou mécanique, éventuellement robotique qui peut notamment créer une communication entre un humain et une partie de son environnement, le cas échéant entre un opérateur et un environnement virtuel.

Environnement Virtuel : renvoie à une technologie informatique qui simule la présence physique d'un utilisateur dans un environnement artificiellement généré par des logiciels.

Environnement Virtuel Immersif : renvoie à une technologie qui reproduit artificiellement des stimuli sensoriels (visuel, sonore ou haptique), qui peut inclure la vue, le toucher, l'ouïe et l'odorat avec l'ambition de plonger l'utilisateur dans l'environnement artificiel.

Ergonomie : L'objet de l'ergonomie est d'élaborer, avec le concours de diverses disciplines scientifiques qui la composent, un corps de connaissances qui doit aboutir à une meilleure adaptation des moyens technologiques de production et des milieux de travail et de vie.

Expérience Utilisateur : concept subjectif qui caractérise toutes les perceptions, réactions émotionnelles et comportement de l'utilisateur lorsqu'il interagit avec un environnement ou une technologie.

Eyetracking (ou oculométrie) : regroupe un ensemble de techniques permettant d'enregistrer les mouvements oculaires.

Facteurs d'influence : caractéristiques intrinsèques aux technologies de l'environnement virtuel, à l'utilisateur ou au contexte et qui ont un impact sur les composants de l'expérience utilisateur.

Interaction Homme-Machine (discipline) : ce domaine étudie la façon dont les humains interagissent avec les technologies ou entre eux à l'aide de technologies, ainsi que la façon de concevoir des systèmes qui soient ergonomiques ou plus généralement adaptés à leur contexte d'utilisation.

Management : vaste discipline (management de projet, management des organisations, ...) qui consiste à mettre en œuvre les moyens matériels et humains pour permettre à l'entreprise d'atteindre son but.

Marketing (ou mercatique) : ensemble des actions qui ont pour objet de connaître, de prévoir et, éventuellement, de stimuler les besoins des consommateurs à l'égard des biens et des services d'une organisation (marchande ou non-marchande) et d'adapter la production et la commercialisation aux besoins ainsi précisés.

Métrique : désigne généralement une unité ou un indicateur de mesure utilisé pour évaluer les composants de la qualité d'un produit ou d'une activité.

Modèle : représentation simplifiée de concepts assemblés en vue de comprendre leur comportement.

Norme ISO : exigences, spécifications, lignes directrices ou caractéristiques, publiées et établies par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), à utiliser systématiquement pour assurer l'aptitude à l'emploi des matériaux, produits, processus et services.

Réalité virtuelle : domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo-naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs.

Son 3D spatialisé : source sonore répartie dans l'espace grâce aux techniques de réglage (e.g., largeur sonore, niveau sonore, fréquence) du signal stéréo. Il participe selon certains auteurs à la sensation d'immersion.

Stéréoscopie : ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception d'image en relief à partir de deux images planes.

Système interactif : application informatique qui prend en compte, au cours de son exécution, l'intervention de l'utilisateur pour organiser son contenu et son affichage.

Test utilisateur : véritable mise en situation qui vise à étudier les comportements des utilisateurs (représentatifs de la population cible du produit en question) face à l'interface.

Utilisateur : personne qui est directement concernée par l'application à évaluer ou à concevoir dans le sens où elle interagit avec pour réaliser une tâche donnée.

# ACRONYME

3D : 3 Dimensions

AEQ : Achievement Emotion Questionnaire (questionnaire d'émotion)

AFPA : Agence nationale pour la Formation Professionnelle des Adultes

CAVE : Cave Automatic Virtual Environment (environnement virtuel automatique CAVE)

CCP : Coefficient de corrélation de Pearson

CUE : Components of User Experience (composants de l'expérience utilisateur)

DK2 : Development Kit 2 (kit de développement 2)

ECG : Electrocardiographe

EEG : Electroencéphalographe

EVEQ-GP : Experimental Virtual Environment Experience Questionnaire-Game Pitkä (questionnaire long d'expérience pour les jeux vidéo en environnement virtuel expérimental)

EVI : Environnement Virtuel Immersif

FPS : First Person Shooter (jeu de shoot à la première personne)

FPS : Frame Per Second (images par seconde)

GB : GigaBytes (gigaoctets)

IHEVI : Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif

IHM : Interaction Homme Machine ou Interface Homme Machine

ISO : International Standardization Organization (organisation internationale de standardisation)

ITQ : Immersive Tendency Questionnaire (questionnaire de tendance immersive)

IVEM : Immersive Virtual Experience Model (modèle d'expérience virtuelle immersive)

IVEQ : Immersive Virtual Experience Questionnaire (questionnaire d'expérience virtuelle immersive)

K-S : Kolmogorov-Smirnov

MES : Modélisation par Equation Structurelle

PIFF : Presence, Involvement and Flow Framework (structure de la présence, implication et flow)

PQ : Presence Questionnaire (questionnaire de présence)

RAM : Random Access Memory (mémoire vive)

SEM : Structural Equation Modeling (MES)

SSQ : Simulator Sickness Questionnaire (questionnaire du mal du simulateur)

TIC : Technologie de l'information et de la communication

UTAUT : Unified Technology Acceptance and Use of Technology (théories unifiées de l'acceptation et l'utilisation de la technologie)

UX : User eXperience (Expérience utilisateur)

# CHAPITRE I. INTRODUCTION, PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE DE RECHERCHE<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence nationale : "Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O. & Richir, S. (2017). Expérience Utilisateur et Interactions Homme-Environnement Virtuel Immersif. 9<sup>ème</sup> Colloque EPIQUE (EPIQUE 2017). Dijon."



## 1. Introduction

Bien que le virtuel ait toujours fasciné l'homme depuis des siècles (Toke, 2017), c'est surtout les années 1980 qui signent l'apparition des environnements virtuels dont la finalité est de provoquer un sentiment d'immersion totale chez l'utilisateur. L'expression antinomique de « réalité virtuelle » apparue dans les années 1990 montre cette volonté de brouiller les frontières entre réalité et fiction (Machinal, 2017). Cependant, la réalité virtuelle n'a connu un essor grandissant que ces dix dernières années, notamment depuis qu'elle s'ouvre au grand public, avec un regain considérable en 2012 qui marque l'arrivée de casques de réalité virtuelle à un prix abordable (e.g., projet « Oculus Rift » de Palmer Luckey).

La réalité virtuelle représente actuellement une technologie qui est utilisée aussi bien dans les secteurs de l'industrie (e.g., Airbus, Renault, Dassault, ...) que dans les secteurs de la recherche avec, entre autres, le projet Walk Again (Nicoletis, 2012) ou encore Human Brain (Huerta, Koslow, & Leshner, 1993). Elle permet des innovations dans les domaines du divertissement (Clais & Roustan, 2003), de l'apprentissage (Mellet-d'Huart & Michel, 2006), de la santé (Klinger, Marié, & Fuchs, 2006), de l'ergonomie (Burkhardt J. M., 2003), de l'Interaction Homme Machine (Grumbach, 2002), de la conception dans les industries (Fuchs & Richir, 2003) ou encore du sport (Bossard, Kermarrec, De Loor, & Pénard, 2009). L'engouement actuel pour les technologies et les périphériques de la réalité virtuelle tels que l'Oculus, le HTC Vive, le Cave Automatic Virtual Environment (CAVE), l'Omni ou la Kinect pousse les chercheurs à étudier ses différents aspects : les dispositifs de réalité virtuelle (i.e., logiciels, matériels comme par exemple le casque de réalité virtuelle), l'expérience perçue qui est vécue par l'utilisateur dans l'environnement virtuel (i.e., sentiment de présence, flow, « cybersickness », ...), les modèles, les méthodes et les outils relatifs aux deux aspects précédents (i.e., les modèles et méthodes).

Du fait de sa multidisciplinarité, la définition de la réalité virtuelle est encore sujette à de nombreux débats. Parmi les définitions existantes, celle de Bowman et McMahan (2007) est relativement exhaustive. Ces derniers décrivent les technologies de réalité virtuelle comme un ensemble de technologies complexes qui remplacent les informations sensorielles du monde réel par des stimuli synthétiques (e.g., vision 3D d'image, son spatialisé, retour de force ou tactile, ...). Cette définition peut être complétée par celle de Fuchs et al. (2003, p. 39) qui affirment que « *la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une ou plusieurs personne(s) 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* ».

Par ailleurs, deux grandes catégories d'environnements virtuels existent :

- les environnements virtuels dits immersifs, dans lesquels tous les sens de l'utilisateur sont sollicités par les stimuli artificiels de l'environnement virtuel (en pratique, il n'existe pas à ce jour d'environnement virtuel totalement immersif qui isole entièrement l'utilisateur de la réalité). Ces technologies se distinguent des environnements non-immersifs, notamment par leur dispositif de vision qui isole complètement de la réalité le champ de vision de l'utilisateur, procurant ainsi une immersion visuelle totale à 360° (e.g., casque Oculus, casque HTC Vive, casque Samsung GEAR, ...). De plus, les environnements virtuels immersifs (EVI) utilisent

généralement des interfaces comportementales aussi bien en entrée (e.g., gants de données, bras à retour d'effort, combinaison, double manette, ...) qu'en sortie (e.g., bras à retour d'effort, dispositif haptique, dispositif de vision, casque audio son 3D spatialisé). Ces dernières sont définies par Fuchs et al. (2003, p. 45) comme « *un dispositif qui exploite la perception et la motricité à la base du comportement humain.* ». Les EVI présentent de nombreux avantages. Par exemple, dans le domaine de la formation ou de l'entraînement, l'EVI a prouvé dans plusieurs études une meilleure efficacité, en termes de réduction de risques, gain de temps, ainsi qu'une facilité de représentation des situations comparé à l'apprentissage ou l'entraînement dans le monde réel (Miles et al., 2012 ; Kolesnikov et al., 2009 ; Edward et al., 2008 ; Downes et al., 1998). Les inconvénients des EVI sont leurs coûts élevés, une qualité moins bonne des images projetées dans le casque de réalité virtuelle comparée aux écrans d'ordinateur et les maux de tête, nausées, vertiges souvent provoqués par la non prise en compte des recommandations de conception des applications et le port prolongé de ces dispositifs.

- les environnements virtuels dits non-immersifs, sont généralement une reconstitution graphique affichée sur un écran d'ordinateur, sans effet de stéréoscopie, dans laquelle l'utilisateur peut interagir en temps réel. Ces environnements virtuels, parfois accessibles sur Internet, présentent des avantages par rapport aux EVI. Ils peuvent, par exemple, surpasser les limites techniques et de rendu visuel que peuvent rencontrer les EVI. De plus, les utilisateurs sont plus habitués aux ordinateurs qu'aux casques de réalité virtuelle. Cependant un grand inconvénient de ce type d'environnement réside dans une moins bonne perception du sentiment de présence et d'immersion qui influence grandement la qualité de l'expérience utilisateur ou User eXperience (UX) qui est perçue.

Ainsi, créer un EVI implique le plus souvent :

- une machine munie d'un processeur capable de reconstituer numériquement et simuler en temps-réel un environnement graphique (e.g., ordinateur, téléphone portable, ...) ;
- un dispositif de vision permettant une vision stéréoscopique de sorte que l'image perçue par l'utilisateur lui paraisse en relief (e.g., casque HTC Vive, cardboard, lunette stéréoscopique, ...) ;
- un dispositif d'interaction dans l'environnement virtuel permettant à l'utilisateur de faire des actions (manette, combinaison, capteurs de mouvement, ...) ;
- enfin, un dispositif sensoriel permettant à l'utilisateur d'avoir un feedback (i.e., visuel, haptique, auditif, tactile, ...) de l'environnement virtuel (e.g., casque HTC Vive, de casque audio, tapis de marche, dispositif haptique, ...).

La réalité virtuelle a de multiples champs d'application. Par exemple, ces technologies peuvent être utilisées en psychologie, notamment dans des thérapies contre les phobies, le stress ou l'anxiété (Bouchard et al., 2002). D'autres applications de la réalité virtuelle concernent l'apprentissage. A titre d'exemple, Rizzo (2011) a proposé un outil pour la formation d'étudiants en psychologie à la confrontation du patient. Ferey et al. (2008) s'intéressent par ailleurs à l'apprentissage des fondamentaux de chimie au travers de la simulation virtuelle de l'interaction des molécules, tandis que Fleury et Madeleine (2007) ont

essentiellement cherché à utiliser la réalité virtuelle pour la découverte de monuments célèbres ou antiques. Yaacoub (2009) propose plutôt cette technologie pour la formation des étudiants en chirurgie. C'est dans le domaine de la santé que réside la troisième application majeure de la réalité virtuelle, en particulier, la rééducation physique ou cognitive après un traumatisme (Rizzo, Buckwalter & Neumann, 1997). Enfin, le domaine du divertissement (e.g., Second Life, Sims, World of Warcraft, Fulldome) s'intéresse aujourd'hui aux technologies de la réalité virtuelle avec l'ambition de mieux immerger l'utilisateur (Schnall, Hedge & Weaver, 2012). Ces nombreuses applications de la réalité virtuelle dans des domaines divers et variés nécessitent de mettre l'accent sur des recherches consacrées aux interactions entre l'homme et ces environnements virtuels plus ou moins immersifs.

Une composante majeure de ces interactions homme-environnement virtuel immersif est l'expérience utilisateur ou l'UX, aussi appelée, qualité de l'expérience – Quality of Experience (Pallot et al., 2013 ; Gaggioli et al., 2003) – ou encore qualité d'expérience virtuelle – Quality of the Virtual Experience (Cruz-Neira, Sandin, & DeFanti, 1993). Cette expérience est celle que l'utilisateur perçoit dans un EVI. L'UX a de nombreuses définitions et reste très subjective. Ce terme, devenu très usité, est présent dans de nombreux domaines tels que le design<sup>2</sup> (i.e., la conception), l'ergonomie, l'interaction homme-machine, le management<sup>3</sup> (i.e., la gestion d'entreprise), la communication, le branding<sup>4</sup> (i.e., la stratégie de marque), l'architecture de l'information (organisation des espaces numériques), l'architecture (Scapin et al., 2012).

Les interfaces homme-environnement virtuel immersif ont par ailleurs l'ambition de favoriser une bonne UX. En conséquence, de nouvelles méthodes mieux adaptées doivent être élaborées pour évaluer ces nouveaux systèmes (Woods & Dekker, 2000). Pour autant, les modèles ainsi que la mesure de l'UX en EVI restent peu traités dans la littérature scientifique (Cheng et al., 2014 ; Shin, Biocca & Choo, 2013 ; Lin & Parker, 2007). En effet, peu de modèles font référence à l'UX en EVI et les seules exceptions ne prennent pas en compte la totalité des composants de l'UX. Chacun de ces modèles centre ses recherches :

- sur un unique composant tel que la « présence » (Gaggioli et al., 2003 ; Riva et al., 2003) ;
- sur un ensemble restreint de composants de l'UX « présence », « immersion » (Hwang et al., 2006) ;
- sur un unique but spécifique à un domaine (e.g., divertissement) ;
- sur un unique but spécifique à une technologie (e.g., simulateur à 6 axes) ;
- sans tenir compte des conséquences négatives (e.g., cybersickness ou mal des environnements virtuels).

La présence est le sentiment d'être « réellement là » dans l'EVI et l'immersion est le ressenti d'être « réellement enveloppé » par l'EVI (Witmer & Singer, 1994). Ces deux derniers

---

<sup>2</sup>Le design (i.e., la conception) est une vaste discipline (design interactif, design industriel, ...) qui consiste à planifier la réalisation et la production d'un objet (produit, interaction, espace, service, ...) ou d'un système.

<sup>3</sup>Le management (i.e., la gestion d'entreprise) est une vaste discipline (management de projet, management des organisations, ...) qui consiste à mettre en œuvre les moyens matériels et humains pour permettre à l'entreprise d'atteindre son but. Pour en savoir plus voir (Mintzberg, 2014).

<sup>4</sup>Dans le domaine du marketing, le branding (i.e., la stratégie de marque) est une discipline qui consiste à gérer les marques des compagnies et l'image de leur marque. Pour en savoir plus, voir Lewi & Rogliano (2006).

composants sont essentiels mais insuffisants pour une expérience de qualité dans l'EVI. Ces modèles restent donc partiels aussi bien dans les composants qu'ils sollicitent que dans les méthodes et les métriques qui permettent de les évaluer. En définitive, ces modèles ne sont qu'en partie adaptés à la conception et l'évaluation d'Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif (IHEVI).

C'est dans ce cadre que cette thèse s'inscrit. Au vu du nombre sans cesse grandissant d'applications de réalité virtuelle, nous soulignons l'importance de prendre en compte les différents composants clés de l'UX pour la conception et l'évaluation d'IHEVI adaptées aux utilisateurs immergés.

Cependant, nous faisons le constat d'une disparité entre le manque dans la littérature scientifique de modèles et outils d'UX adaptés aux EVI et l'engouement des entreprises et du grand public pour cette technologie. En effet, les études sur le sujet de l'UX en EVI n'apportent pas suffisamment de solutions aux entreprises. En conséquence, l'intérêt de nos travaux expérimentaux se situe dans une démarche intégrative visant non seulement à apporter de nouvelles connaissances venant combler le manque de la littérature quant aux modèles d'UX en EVI, mais aussi à proposer des méthodes et des outils pertinents pour optimiser l'UX des EVI répondant ainsi aux besoins des entreprises et du grand public.

L'objectif de cette thèse est finalement de proposer et de valider un modèle théorique permettant de caractériser l'UX dans les interactions homme-environnement virtuel immersif.

A travers cet objectif, nous répondons à un besoin tant scientifique (i.e., combler un manque dans la littérature scientifique sur les modèles d'UX des EVI) qu'opérationnel en équipant les concepteurs d'EVI d'un outil opérationnalisant le modèle.

Ce manuscrit est structuré en huit chapitres. Dans le chapitre I, nous exposons notre introduction et notre problématique évoquant d'une part le besoin d'un modèle d'UX holistique sur le plan scientifique et d'autre part d'un outil opérationnel pour l'aide à la conception des EVI. Puis, nous proposons la démarche de recherche et nos trois objectifs pour y répondre.

Le chapitre II constitue notre état de l'art. Après avoir proposé quelques éléments de définitions, nous présentons une synthèse des facteurs, composants et modèles fondamentaux de l'UX et plus particulièrement en EVI. La section qui suit décrit les études empiriques identifiant les méthodes de mesure de l'UX d'une part et de l'UX pour les EVI d'autre part. Cet état de l'art nous permet de repérer en quoi ces différents modèles sont complémentaires.

Le chapitre III expose notre contribution théorique qui constitue le modèle théorique. Il détaille la construction de notre modèle, présente ses composants et les facteurs d'influence identifiés.

Le chapitre IV expose notre contribution méthodologique qui constitue un outil opérationnel. Ce chapitre débute par une proposition de différents questionnaires permettant de mesurer les composants de notre modèle « Immersive Virtuel Experience Model » (IVEM). La construction de notre questionnaire « Immersive Virtuel Experience Questionnaire » (IVEQ), est décrite de façon détaillée.

Le chapitre V présente l'étude expérimentale que nous avons menée afin de valider le questionnaire IVEQ, ainsi que l'analyse des données et des résultats obtenus.

Le chapitre VI présente les études expérimentales permettant la validation de notre modèle holistique IVEM d'UX en EVI. La méthodologie mise en place est ensuite décrite de façon détaillée, ainsi que l'analyse des données et des résultats obtenus.

Le chapitre VII décrit une étude expérimentale, réalisée en entreprise, mettant en application le questionnaire IVEQ validé à travers un exemple d'utilisation : l'évaluation et la comparaison de deux périphériques immersifs en termes d'UX.

Le chapitre VIII comprend la discussion générale. Nous y expliquons dans quelle mesure nos contributions empiriques permettent de caractériser l'UX en EVI à travers notre modèle holistique dédié ainsi que son outil opérationnel d'évaluation : le questionnaire IVEQ.

En conclusion, nous synthétisons les apports théoriques et méthodologiques de cette thèse, avant d'ouvrir sur trois perspectives de recherche.

## **2. Problématique et démarche de recherche**

Dans cette section nous exposons notre problématique de recherche qui porte sur le manque dans la littérature scientifique des modèles d'UX spécialement conçus pour les EVI. Pour répondre à cette problématique, notre démarche de recherche s'articule autour de trois étapes qui répondent à nos trois objectifs suivants :

- La première concerne la proposition et la validation de notre modèle holistique d'UX adapté aux EVI basé sur plusieurs théories et modèles existants.
- Ce modèle a été opérationnalisé à travers la construction et la validation d'un questionnaire. Ce deuxième point constitue notre deuxième étape.
- La troisième étape concerne l'application du modèle à travers l'utilisation du questionnaire validé dans le cadre d'une problématique identifiée dans une entreprise qui conçoit des applications mobilisant les technologies immersives de réalité virtuelle.

### **2.1 Objectifs et problématiques**

Cette thèse a trois objectifs. Tout d'abord, il s'agit de proposer et de valider un modèle théorique permettant de caractériser l'UX dans les interactions homme-environnements virtuels immersifs. Pour mener à bien cet objectif, nous avons proposé une revue de la littérature scientifique dédiée non seulement aux modèles de l'UX en général, mais aussi aux modèles, aux composants clés, aux facteurs influents de l'UX en EVI en particulier et à leurs relations d'interdépendance. Cette recherche bibliographique nous a finalement permis de développer un modèle théorique de l'UX en EVI. Nous avons sélectionné les composants clés et les facteurs d'influence de plusieurs modèles théoriques afin d'aboutir à notre modèle unifié. Cela nous permet de pallier à une première problématique concernant le manque dans la littérature scientifique de modèles d'UX des EVI.

L'étude empirique, présentée dans le CHAPITRE VI, a eu pour but principal de valider les relations intra-composants et entre facteurs d'influence/composants de notre modèle unifié proposé, conduisant de cette manière à une version validée de notre modèle d'UX des EVI.

Le second objectif a été non seulement de construire mais aussi de valider un outil opérationnalisant le modèle afin d'assister la conception et l'évaluation des IHEVI. Cet outil d'évaluation est un questionnaire pour évaluer l'UX des EVI. Cet outil est l'une des méthodes d'évaluations subjectives la plus souvent utilisée pour évaluer l'UX (Lallemand et al., 2015). Pour répondre à ce second objectif, nous avons proposé une revue de la littérature sur les échelles de questionnaires d'UX relative aux composants clés de l'UX en EVI identifiés dans notre modèle afin de proposer notre questionnaire unifié de l'UX en EVI. Pour élaborer le questionnaire, nous avons associé un questionnaire existant à chacun des composants de notre modèle puis nous avons sélectionné un certain nombre d'items proche du contexte d'évaluation d'un EVI. Nous avons finalement validé notre questionnaire, plus particulièrement nous avons éprouvé l'adéquation des items permettant de mesurer l'UX des EVI. Nous espérons ce questionnaire pertinent pour les concepteurs d'applications mobilisant de telles technologies. Cet objectif vient répondre à une problématique de manque d'outil opérationnel d'UX des EVI permettant d'équiper les concepteurs d'EVI.

Notre troisième objectif concerne l'utilisation de notre questionnaire alors validé dans le cadre d'une problématique en entreprise qui concernait le choix entre deux dispositifs immersifs (de type CAVE ou salle immersive et de type casque mobile de réalité virtuelle) pour l'utilisation d'une application de réalité virtuelle ludo-éducative. Le questionnaire a permis de mesurer les composants de l'UX pour ces deux périphériques utilisant la même application. Une comparaison des résultats des scores de l'UX a permis de déterminer le périphérique le plus adapté à l'application. A l'issue de cette étude, nous avons été en capacité de fournir des lignes directrices quant aux facteurs d'influence (e.g., largeur du champ visuel, niveau d'interactivité) qui impactent les composants de l'UX (e.g., présence, flow, émotion). Cet objectif vient répondre à une problématique de manque d'informations sur les étapes détaillées d'utilisation des outils d'évaluation de l'UX des EVI. Nous proposons donc notre propre description détaillée de l'évaluation de l'UX associée à nos questionnaire et modèle.

## 2.2 Démarche de recherche

Pour répondre à nos trois objectifs, trois études ont donc été conduites. Les deux premières études ont été réalisées à partir des mêmes données collectées, mais sélectionnées et analysées de façon distincte et pertinente pour répondre aux 2 premiers objectifs, à savoir valider un modèle théorique et valider un questionnaire (la validation du questionnaire étant intrinsèque à la validation du modèle). Ce choix a été fait car la validation d'un modèle et d'un questionnaire implique *a minima* 150 participants respectivement (soit, 300 participants environ). Or, nous savions par avance les difficultés que nous aurions pour recruter un tel échantillon. Nous avons donc choisi d'utiliser la même population et de collecter à la fois les données nécessaires à la validation de notre modèle et celles requises pour valider notre questionnaire. La troisième étude, réalisée ultérieurement aux deux premières, apporte des éléments de réponse au troisième objectif.

Concernant les deux premières études, il convient ici d'apporter certaines précisions visant à expliciter notre parti pris et la méthodologie mise en place. Comme nous venons de le mentionner, il n'était pas possible de recruter deux échantillons de 150 personnes, donc nous avons dû faire le choix d'utiliser la même population, et donc la même méta-expérimentation *in fine*, ce qui revenait donc à chercher à valider notre modèle en nous appuyant sur les données issues du questionnaire que nous cherchions à valider (i.e., à en éprouver la validité et la sensibilité). Nous avons donc fait le choix de concevoir un protocole expérimental rigoureux pour les 2 études afin d'éviter tout biais (cf. CHAPITRE V et CHAPITRE VI), qui nous permettrait d'obtenir les données nécessaires pour répondre aux 2 premiers objectifs. La démarche méthodologique a été de valider en premier lieu le questionnaire, puis de ne considérer que les données issues des items validés pour la validation du modèle. Naturellement, la non validation du questionnaire (e.g., par la suppression d'un trop grand nombre de d'échelles ou d'items) aurait stoppé la démarche expérimentale et aurait nécessité une nouvelle étude. Ce parti pris, certes risqué mais nécessaire au regard de l'impossibilité de constituer deux échantillons de taille importante, s'est heureusement avéré payant.

En outre, deux postures ont été adoptées. Dans la première et la seconde étude, nous avons adopté la posture d'évaluateur « en laboratoire ». Ce statut nous a permis de contrôler toutes les données en entrées (i.e., profil de l'utilisateur, paramétrage de l'EVI) et d'avoir accès à l'ensemble des données produites (i.e., score aux échelles, performance). Dans la troisième étude, nous avons adopté la posture de consultante UX. Ce statut nous a permis de favoriser l'intégration du modèle à travers l'utilisation du questionnaire alors validé dans un processus de conception pour orienter cette dernière vers une conception centrée sur l'UX.

Les chapitres qui suivent reflètent la structuration de nos études : un chapitre par construction (modèle et questionnaire) et par étude. Nous explicitons cette approche et structuration ci-après.

## 2.3 Approche expérimentale

L'ergonomie peut contribuer à la conception et à l'évaluation d'IHEVI selon deux approches : la première repose sur des investigations inspirées de l'expérimentation, tandis que la seconde vise à intégrer les différentes dimensions de l'activité orientée et "située" de l'homme avec des outils (Burkhardt J.-M. , 2003). Nos travaux s'inscrivent dans la première approche. C'est en effet, l'approche expérimentale que nous avons utilisée dans les trois études.

### 2.3.1 Expérimentations en laboratoire

L'expérimentation en condition de laboratoire était requise pour l'investigation de l'association des items des sous-échelles entre eux de notre questionnaire élaboré (cf. étude décrite dans le CHAPITRE V). Ainsi que pour la validation de l'impact des facteurs d'influence sur les composants de l'UX et de l'interdépendance des composants (e.g., les compétences perçues influencent positivement le flow) (cf. étude décrite dans le CHAPITRE VI).

L'expérimentation en laboratoire nous a permis de :

- Concevoir une situation artificielle qui comportait à la fois une composante ludique et éducative. En effet notre modèle ayant été conçu à partir des composants clés de l'UX provenant des domaines les plus souvent visés par les EVI (i.e., apprentissage, divertissement, ludo-éducatif), nous voulions d'abord le valider dans l'un de ces domaines.
- Produire une situation dans laquelle les caractéristiques de l'EVI à étudier sont contrôlées. Cela nous a permis de créer cinq conditions durant lesquelles certaines caractéristiques de l'EVI variaient (e.g., largeur de champ visuel, périphériques d'interaction, fréquence d'image, ...).

Les données collectées dans les deux premières études étaient :

- Des données sur le profil des participants (i.e., âge, profession, niveau en programmation, fréquence d'utilisation des technologies de RV). Ces données nous ont permis de classer les participants par groupe d'individus expérimentés ou non expérimentés et de comparer leur expérience vécue.
- Des scores aux échelles de notre questionnaire puisque ce dernier permettait de recueillir à la fois les données permettant d'étudier le questionnaire et le modèle. Pour l'étude du modèle, la mesure de l'UX dans chacune des cinq conditions représentées a été réalisée grâce au questionnaire. Ces scores nous ont permis d'analyser les différences entre les valeurs de l'UX pour chacune des conditions.
- Des listes de points de vue positifs, négatifs de l'expérience et une liste de points d'améliorations de l'EVI. Ces listes nous ont permis de comprendre les raisons des scores négatifs ou positifs donnés aux items.
- Des données d'utilisabilité objective (i.e., performances) recueillies dans chacune des cinq conditions.

### 2.3.2 Expérimentation en entreprise

La troisième étude qui consistait en une application possible de notre questionnaire validé et de notre modèle dans le cadre d'une problématique en entreprise visant à déterminer le meilleur dispositif immersif en termes d'UX a également mobilisé une approche expérimentale mais en contexte d'entreprise (cf. CHAPITRE VII).

Cette expérimentation en entreprise nous a, quant à elle, permis de conduire notre étude sur une application ludo-éducative. L'entreprise EON Reality fait en effet partie des plus grands éditeurs d'applications du domaine ludo-éducatif mobilisant la réalité virtuelle.

Les données produites par les participants dans la troisième étude étaient :

- Des données de connaissances sur l'Égypte antique avant et après l'utilisation de l'EVI. L'analyse de ces connaissances nous ont permis de vérifier si l'application procurait un certain apprentissage, s'agissant d'une application ludo-éducative.
- Des scores aux échelles de notre questionnaire pour chacun des dispositifs. Ces scores nous ont permis d'analyser le dispositif le mieux noté (i.e., celui favorisant une meilleure UX) pour l'application King Tut VR 2 puis de proposer des

recommandations grâce à notre modèle pour optimiser les composants de l'UX les moins bien notés.

- Des listes de points de vue positifs, négatifs de l'expérience et une liste de points d'améliorations de l'EVI. Ces listes nous ont permis de comprendre les raisons des scores négatifs ou positifs donnés aux items pour chaque dispositif.
- Des données d'utilisabilité objective (i.e., temps de réalisation de la tâche) recueillies pour chacun des dispositifs.

## 2.4 Structuration des chapitres

La première étude (CHAPITRE V) décrit une expérimentation destinée à valider notre questionnaire IVEQ proposé dans le CHAPITRE IV. Cette expérimentation a été conduite sur l'application immersive nommée « Think and Shoot » que nous avons développée.

La deuxième étude, portant sur la validation du modèle (CHAPITRE VI), avait deux objectifs, le premier était de valider l'impact des cinq facteurs d'influence sur les composants de notre modèle, le second de valider les relations d'interdépendances entre ces composants. Pour répondre au premier objectif, nous avons mené cinq expérimentations : chacune d'elle a pour objectif de valider l'impact d'un des cinq facteurs d'influence sur les composants de notre modèle IVEM. Elles ont été conduites sur la même application immersive « Think and Shoot ». Elles partagent également le même matériel de mesure (e.g., questionnaire d'identification, questionnaire d'UX) et les mêmes données que dans la première étude. La seule différence se situe dans la prise en compte des données recueillies provenant des participants, chaque expérimentation traitant un facteur d'influence avec un sous-groupe distinct de participants (e.g., dans cette étude, un participant ayant passé l'expérimentation 1 n'a pas passé l'expérimentation 5). Le second objectif de cette étude impliquant la validation de l'interdépendance des composants, les données issues des 5 expérimentations ont été rassemblées pour être traitées statistiquement comme un tout.

De la même manière que pour la seconde étude, ce sont les données issues de l'ensemble des 152 participants qui ont été analysées pour permettre la validation du questionnaire. Des précisions sur la prise en compte de ces données seront apportées dans le CHAPITRE V (utilisation des données restreintes aux conditions optimales de passation pour les 5 facteurs considérés).

La troisième étude (CHAPITRE VII) décrit une expérimentation destinée à appliquer notre modèle à travers le questionnaire IVEQ. Tout le matériel expérimental a spécialement été conçu ou choisi uniquement pour cette expérimentation (e.g., questionnaire d'identification, questionnaire d'apprentissage, application ludo-éducative King Tut VR), le questionnaire IVEQ utilisé était la version validée à l'issue de la deuxième étude.

## 2.5 Analyses statistiques pour le traitement des données

Les données des trois études expérimentales rapidement évoquées précédemment et détaillées dans les CHAPITRE V, CHAPITRE VI et CHAPITRE VII ont été traitées *via* des statistiques descriptives classiques (i.e., Moyenne, Ecart-Type) et des statistiques inférentielles (i.e.,

calcul de la cohérence interne des items et sous-échelle, observation de la distribution des scores, estimation des relations significatives et des différences significatives).

Pour la première étude, nous avons défini la cohérence interne des sous-échelles et des items par le calcul des coefficients de corrélation respectivement de l'alpha de Cronbach et de Pearson. L'alpha de Cronbach indique la force de la relation entre les items d'une sous-échelle. Le coefficient de Pearson est une indication de la force de la relation entre un item et la totalité des items. Une valeur de l'alpha de Cronbach supérieure à 0,7 a été mobilisée pour considérer la relation comme étant fiable (Devellis, 2003). Une valeur du coefficient de Pearson égale à zéro indique qu'il n'y a aucune relation. S'il est égal à 1, il indique une parfaite corrélation positive et s'il est égale à -2, il indique une parfaite corrélation négative. Compris entre 0,1 et 0,29 le coefficient de Pearson indique une faible corrélation, entre 0,3 et 0,49 il indique une corrélation modérée et entre 0,5 et 0,99 il indique une forte corrélation (Cohen, 1988). Pour indiquer si ces corrélations (associée au coefficient de Pearson) sont significatives on vérifie leur probabilité d'erreur  $p$ . Si  $p$  est inférieure à 0,05 la relation existe, si  $p$  est inférieure à 0,01 la corrélation est forte et si  $p$  est inférieure 0,001 elle est très forte. Pour cette étude, nous avons également observé la sensibilité interindividuelle des scores aux échelles à travers le test de Kolmogorov-Smirnov. Ce test compare le résultat de la distribution des scores avec la distribution normale de Gauss. Une très grande majorité de grandeurs physiques se décrit par cette distribution qui est la plus fréquente dans la nature. Cette distribution peut varier d'une distribution symétrique (i.e., pas de déviation) à une distribution déviée positivement ou négativement.

Pour la deuxième étude, les moyennes et écart-types de chaque sous-échelle et des performances (e.g., temps de réalisation de la tâche, score, niveau atteint, ...) ont été calculés pour chacune des cinq expérimentations. Les différences significatives entre les valeurs de l'UX subjective des cinq expérimentations ont été calculées à l'aide du test de Student. Si la probabilité d'erreur de ce test est significative (i.e.,  $p$  inférieur à 0,05) il indique une différence réelle des deux observations (e.g., condition témoin et modifiée), si elle ne l'est pas (i.e.,  $p$  supérieur à 0,05), il indique une simple fluctuation aléatoire due au fait que la mesure a été effectuée sur plusieurs individus. Une modélisation par équation structurelle (SEM : Structural Equation Modeling ou MES) a été réalisée pour déterminer la significativité des relations entre sous-échelles. Cette analyse a été conduite à travers un graphe de relation qui constitue une méthode d'exploration de données. Une fois que les scores dont on souhaite analyser les croisements sont renseignés pour former le graphe, les analyses bivariées (i.e., covariance, significativité) sont déclenchées *via* un outil statistique (e.g., SPSS©).

Pour la troisième étude, les moyennes et écart-types de chaque sous-échelle et des performances (i.e., temps de réalisation de la tâche) ont été calculés pour chacun des deux périphériques. Les différences significatives entre les valeurs de l'UX subjective pour les deux périphériques ont été calculées à l'aide du test de Student.

Ces calculs ont été effectués à l'aide du logiciel IBM® SPSS ©.

## 2.6 Synthèse de la démarche de recherche

Une synthèse des cinq étapes de notre démarche de recherche associées aux chapitres dans lesquels elles sont décrites est présentée dans la Figure 1.

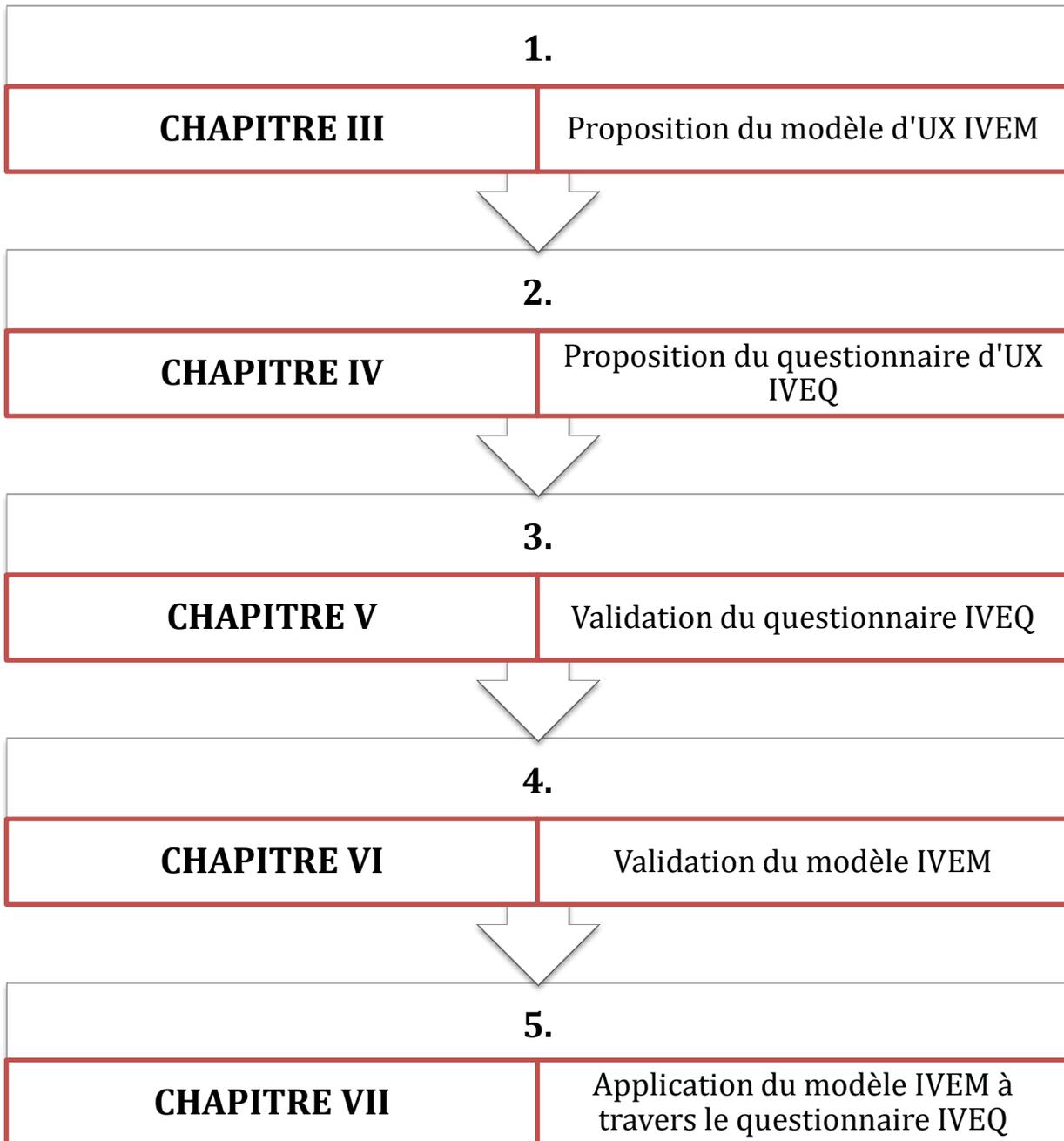


Figure 1. Synthèse de notre démarche de recherche



## CHAPITRE II. EXPERIENCE UTILISATEUR EN INTERACTION HOMME-ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence nationale : « Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., Canac, G., Farin, F., & Richir, S. (2015). Vers un modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif : Une analyse de la littérature. In *Proceedings of the 27th Conference on Interaction Homme-Machine (IHM2015)* (p. 26). Toulouse: ACM ».



## 1. Introduction

L'objectif de cet état de l'art est de caractériser le concept d'UX en général et d'UX en EVI en particulier. Pour ce faire, après avoir proposé quelques éléments de définitions de l'UX dans différents domaines (e.g., ergonomie des IHM, marketing, ...) et plus particulièrement dans le domaine des EVI, nous examinons les littératures de ces domaines pour présenter une synthèse des facteurs, composants, modèles fondamentaux de l'UX et études empiriques identifiant les méthodes de mesure de l'UX. Cet état de l'art nous permettra de repérer en quoi ces différents modèles sont complémentaires.

Nous verrons que les modèles proposés sont « centrés produit » (i.e., centrés sur des critères d'amélioration du produit) ou centrés utilisateur (i.e., centrés sur l'amélioration des perceptions de l'utilisateur). Ce sont ces derniers qui finalement font figure de références pour examiner l'UX. En effet les processus, méthodes et modèles centrés utilisateurs ont fait l'objet de nombreuses études et prouvé leur efficacité aussi bien technique, en améliorant les applications, qu'humaine en rendant les interactions plus naturelles et intuitives. En matière d'EVI, nous considérons qu'un défi reste encore à relever quant à l'identification des composants en jeu pour générer une bonne UX. En effet il s'agit d'une technologie faisant appel aux réflexes et processus cognitifs de l'humain ce qui fait qu'elle est exigeante et demande une certaine rigueur en matière de conception et d'évaluation de l'UX.

## 2. Éléments de définition de l'expérience utilisateur

Dans cette section nous examinons quelques éléments de définition de l'UX. Nous montrons que l'UX est un concept qui intervient dans de nombreuses disciplines. Chacune d'elles le définit suivant ses objectifs respectifs vis-à-vis de l'utilisateur. Par exemple, l'objectif du marketing peut principalement se résumer en la fidélisation de l'utilisateur. Celui de l'architecture de l'information se résume en l'adaptation du contenu et de l'accès à l'information relative aux tâches de l'utilisateur. Celui de l'ergonomie des Interactions Homme-Machine consiste essentiellement à évaluer et concevoir des interfaces qui suscitent des interactions compatibles avec les attentes et les capacités de l'utilisateur.

Les différents approches, méthodes et concepts relatifs à chaque discipline rendent l'UX difficile à appréhender, notamment depuis ces dernières années où elle est devenue très ancrée dans l'ère du temps et se retrouve donc potentiellement utilisée de façon abusive. Nous proposons donc d'examiner les définitions ou notions proches à la fois de l'expérience utilisateur provenant de la norme ISO 9241-210 (2009) collectivement admise et également de la littérature scientifique dédiée aux domaines du marketing, de l'architecture de l'information, de l'ergonomie des Interactions Homme-Machine, du design interactif, et des environnements virtuels. De façon générale, les définitions de l'UX, qui concernent la relation entre l'homme et un système, le plus souvent interactif, se rejoignent.

### 2.1 Expérience utilisateur d'après l'Organisation Internationale de la Standardisation

L'Organisation Internationale de la Standardisation (ISO : International Organization for Standardization) propose des outils et méthodes de bonne pratique afin d'assurer la sécurité,

la bonne qualité et la fiabilité des produits sur le marché. D'après la norme ISO 9241-210 (2009), l'UX se définit comme « *les perceptions et les réponses (physiques et psychologiques) d'une personne qui résultent de l'usage ou de l'anticipation de l'usage d'un produit, d'un système ou d'un service* ». En outre, elle précise que cette UX inclut non seulement les perceptions et les réponses de l'utilisateur, mais également « *ses émotions, ses croyances, ses préférences, ses comportements et ses réussites qui se présentent avant pendant ou après l'usage* ». Par ailleurs, l'UX « *est une conséquence de l'image de la marque, la présentation, la fonctionnalité, la performance du système, du comportement interactif et de la capacité d'assistance du système interactif* ». Cette définition générale de l'UX suggère une multitude de possibilités d'interprétations, et explique ainsi que plusieurs disciplines se soient appropriées le terme en faisant apparaître des nombreuses définitions dérivées. Ces innombrables possibilités font de l'UX une notion encore difficile à cerner. Quelques-unes de ces définitions sont présentées dans les sections qui suivent.

## 2.2 Expérience utilisateur en marketing

Le marketing, une discipline qui a connu plusieurs phases d'évolution, s'est particulièrement transformé avec l'ère d'internet qui a vu apparaître de nouveaux paradigmes d'interaction, de types de produits et de services sur le marché. La recherche en marketing est définie par Stone et Desmond (2007, p. 115) comme « *l'activité selon laquelle les informations du marché sont recueillies et analysées afin de réduire les risques liés à la prise de décision* ». Une part majeure de cette activité est consacrée à l'analyse du processus de décision de l'utilisateur. Ainsi, face à la prolifération de systèmes d'information et de contenus internet centrés utilisateur, le marketing s'est vu adopter une stratégie axée sur l'expérience de l'utilisateur. Cette stratégie consiste à « *provoquer le plaisir ou le désir [...] dans l'expérience d'utilisation* » (Février et al. 2011, p. 2). Dans son article sur l'UX et le processus du marketing, Swenson (2011, p. 21) décrit l'UX comme « *subjectif par sa nature, puisqu'il se réfère à ce que l'utilisateur ressent et la façon dont il réagit à une application [...] qu'il utilise* ». Cet auteur ajoute que l'UX « *inclut les perceptions de facilité d'utilisation et d'efficience ainsi que ses pensées à propos d'un site* ». En marketing, la finalité de l'UX consiste tout d'abord à faire adopter le produit par ses utilisateurs avant d'assurer l'adhésion à l'image de marque véhiculée. Le processus sous-jacent à cette adoption se base sur la notion d'acceptabilité des produits et consiste à évaluer les perceptions, le ressenti, les comportements de l'utilisateur avant, pendant et après leurs usages. L'objectif de ces mesures est de mieux comprendre les raisons d'usage ou de non usage de ces produits.

## 2.3 Expérience utilisateur en architecture de l'information

L'architecture de l'information est une discipline visant à simplifier l'interaction et l'utilisation des informations en fonction du système, du type d'utilisateurs et de leurs usages. Pour cela, elle se focalise particulièrement sur les activités de navigation et de recherche d'informations de l'utilisateur. L'information doit lui être présentée de manière aisée, sous la forme requise, tout en étant utile. Cette discipline permet d'architecturer tout type de contenu mais est particulièrement développée dans le domaine du web (e.g., site internet, application mobile, etc.). D'après Habert et al. (2012, p. 4), « *un architecte de l'information est un spécialiste de l'organisation et du repérage des contenus et un spécialiste de l'expérience*

*utilisateur* ». Pour Bellino (2013), consultante en ergonomie et architecture de l'information, l'UX désigne l'utilisabilité informationnelle perçue par l'utilisateur. Cette notion désigne à la fois la réparabilité définie comme « *l'habileté des utilisateurs à identifier un site pertinent et à naviguer dans les pages du site pour découvrir et rechercher les informations pertinentes* » (Morville P. , 2005) et la qualité des informations qui regroupe le jugement des utilisateurs notamment sur la fiabilité, la validité et l'exhaustivité des informations présentées. L'architecture de l'information contribue également à l'acceptabilité de la technologie, support de l'information.

## 2.4 Expérience utilisateur en ergonomie des Interactions Homme-Machine

L'ergonomie étudie le fonctionnement de l'humain et l'activité qu'il déploie lors de l'utilisation d'un système dans un contexte donné. L'Interaction Homme-Machine (IHM) quant à elle est une branche de l'informatique qui s'applique essentiellement à la conception des interfaces interactives. Son objectif est de procurer une bonne UX dans les interactions et interfaces qu'elle propose, elle tente d'atteindre ce but depuis 1986 en appliquant la conception centrée utilisateur (CCU) qui place l'utilisateur au centre de la démarche de conception (Norman & Draper, 1986). L'IHM partage la même définition de l'UX que l'ergonomie en se focalisant davantage sur l'utilisabilité subjective (e.g. satisfaction) et la mesure de performances de l'utilisateur. L'ergonomie des IHM s'inspire de ces deux disciplines et vise ainsi à concevoir des interfaces ergonomiques, efficaces, faciles, adaptés au contexte d'utilisation. Un des attributs essentiels de cette discipline est sa pluridisciplinarité (e.g., informatique, ergonomie, design, etc.). Elle fait par exemple appel aux recommandations ou normes ergonomiques relatives à l'évaluation des systèmes. Les méthodes d'ergonomie des IHM veillent ainsi à ce qu'un système corresponde pleinement aux besoins des utilisateurs, soit facile à utiliser et contribue à une UX satisfaisante (Loup-Escande & Lécuyer, 2014 ; Burkhardt & Sperandio, 2004). Pour Barcenilla et Bastien (2009), l'UX consiste à « *prendre en compte les différentes facettes de la personnalité de l'individu, la cognition, mais aussi les affects (attitudes, émotions, etc.), ainsi que les caractéristiques des produits et des systèmes techniques qui influencent ces aspects* ». Par ailleurs, la norme ISO 9241-210 (2009), en préconisant des mesures subjectives telles que les émotions, les croyances, les préférences, atteste d'un changement de point de vue dans l'étude des usages. Les critères de performances habituellement utilisés pour évaluer l'UX semblent montrer leurs limites dans le contexte actuel d'évolution des technologies. En effet, les systèmes d'interaction « *deviennent non seulement plus utiles et utilisables mais ils deviennent également désirables et à la mode* » (Hassenzahl & Tractinsky, 2006, p. 91). Une observation d'autant plus pertinente que l'UX est définie comme une conséquence de « *l'état intérieur de l'utilisateur, des caractéristiques du système à concevoir et du contexte d'utilisation* » (Hassenzahl & Tractinsky, 2006, p. 95). Certains travaux dans le domaine de l'ergonomie des IHM, démontrent ainsi que certains aspects de la technologie, comme par exemple l'esthétique, agissent effectivement sur l'état intérieur de l'utilisateur (e.g., affects) et donc sur l'UX (Thüring & Mahlke, 2007). Les normes relatives à l'UX évoluent aussi dans ce sens en proposant de tenir compte des aspects plus subjectifs (e.g., esthétique, plaisir intrinsèque procuré, ...).

Une partie de la discipline de l'ergonomie des IHM consiste à produire plusieurs perspectives sous forme de maquette, prototype à la manière d'un designer qui seront des éléments

essentiels au processus d'évaluation du projet (Zimmerman et al., 2007). En effet, le design interactif est fortement lié à la dimension de l'utilisateur, ce dernier étant « *le facteur qui détermine l'émergence et le déroulement du design* » (Bréandon, 2012). En outre, dans le domaine du design interactif, Alben (1996) définit la notion de qualité de l'expérience comme « *le ressenti au toucher, la compréhension du fonctionnement, le ressenti lors de son utilisation, la manière dont il sert le but des utilisateurs et comment il intègre le contexte d'utilisation* ». L'influence affective de l'utilisateur constitue l'un des principaux objectifs du design d'interaction. Cette considération subjective a fait naître l'« expérience design » (Dalsgård & Halskov, 2006), un sous-ensemble qui se focalise essentiellement sur l'utilisateur, le contexte d'utilisation, ses intentions et ses valeurs.

## 2.5 Expérience utilisateur dans les environnements virtuels

En introduction de ce manuscrit, nous avons défini la réalité virtuelle et les environnements virtuels et présenté brièvement son champ d'application et quelques champs de recherche auxquels s'intéressaient les scientifiques concernés. La réalité virtuelle est donc une catégorie de système interactif qui cherche à immerger l'utilisateur dans un environnement virtuel artificiel interactif avec plus ou moins de réalisme selon le type d'application (Fuchs & Moreau, 2003). L'expérience utilisateur définie dans la réalité virtuelle est sensiblement tirée des définitions précédemment proposées pour les systèmes d'interaction plus « classiques ». Wu et al. (2009, p. 481) définissent par exemple l'expérience utilisateur (i.e., qualité d'expérience) en environnement virtuel comme « *une construction multidimensionnelle des perceptions et comportements de l'utilisateur* ». À ces perceptions de ressenti au toucher, d'esthétisme visuel, d'utilisabilité ou d'adoption vont s'ajouter des perceptions propres aux environnements virtuels, comme par exemple les sentiments de présence ou d'immersion intrinsèques à un environnement virtuel ayant une UX pertinente.

L'UX en EV nécessite aussi bien les méthodes de conception et d'évaluation issues des 2 disciplines de l'informatique (IHM) et de l'ergonomie. C'est pourquoi ce manuscrit s'inscrit dans ces deux champs disciplinaires.

## 3. L'expérience utilisateur : facteurs, composants et modèles

L'UX est souvent définie à travers des dimensions (e.g., caractéristique du système, utilisabilité, expérience esthétique, adoption, etc.).

Nous avons identifié deux catégories de dimensions. Celles qui sont liées aux perceptions de l'utilisateur et qui caractérisent l'UX (e.g., l'utilisateur perçoit le système comme désirable ou utilisable) sont désignées comme les « composants de l'UX ». Celles qui sont liées à des facteurs externes et qui impactent l'UX sont désignées comme les « facteurs d'influence de l'UX ». Ces derniers peuvent être liés aux caractéristiques du système (e.g., procédé de conception, champ de vision, niveau d'interactivité), du contexte d'utilisation, de l'utilisateur (e.g., sexe, culture, expériences précédentes), etc. Ainsi, les composants de l'UX énoncés précédemment (e.g., aspect désirable, utilisable) définissent l'UX tandis que les facteurs d'influence sont, quant à eux, prédéfinis en fonction du système conçu, du contexte ou de l'utilisateur lui-même. Nous avons observé dans la section précédente, que les facteurs et

composants de l'UX varient selon la discipline ciblée. Nous identifions donc dans cette partie, les facteurs et composants clés les plus souvent représentés dans ces disciplines, les liens établis entre eux, ainsi que les modèles de l'UX qu'ils composent.

### 3.1 Facteurs d'influence

Selon la norme ISO 9241-210 (2009), l'UX est la conséquence des propriétés du système (Tableau 1). Elle suggère que l'**image de la marque** influencerait l'UX. En effet, le système est généralement conceptualisé dans le but de se différencier des autres et de générer une image (i.e., réputation, célébrité, prix bas, catégorie de produit, etc.) autour de valeurs ou principes (e.g., écologique, éthique, luxe, fiable, etc.) qui perdureraient chez l'utilisateur et l'influenceraient dans son expérience (Porter & Claycomb, 1997 ; Dupré et al., 2017). Un exemple d'influence est l'image de la marque « Scotch » dont l'influence est telle que le nom de la marque est utilisé par la plupart des personnes à la place du terme générique « bandes adhésives ». La **présentation** (e.g., pertinence, personnalisation, format, qualité d'image, etc.) du système interactif jouerait ainsi un rôle dans l'UX, comme l'ont observé Mandel et Johnson (2002) qui rapportent qu'un changement mineur dans la présentation, comme par exemple la couleur de fond d'un site internet, peut avoir une influence sur le choix d'un produit. Les **fonctionnalités** (e.g., gestion, affichage, navigation, etc.) proposées à l'utilisateur seraient également déterminantes dans son expérience, dans la mesure où elles sont développées pour répondre à ses besoins et envies. Les **performances** (e.g., vitesse de réponse, capacité de mémoire, puissance) du système influenceraient également l'UX. En effet, en fonction de ses performances, un système est perçu comme répondant plus ou moins à un besoin. Son **comportement interactif** (e.g., type d'interaction, retour visuel, dialogue interactif, gestion des erreurs, etc.) joue également sur la satisfaction du besoin. Dans cette définition, nous identifions par ailleurs des caractéristiques de l'utilisateur liées à sa personnalité, comme ses **croyances** (e.g., auto-efficacité<sup>6</sup>, technophilie, etc.), définies comme le fait que l'utilisateur se croit doué ou non avec la technologie. Ses **préférences** (e.g., esthétique, technologique, linguistique, type d'activité, etc.) définies comme son goût plus ou moins prononcé pour certaines caractéristiques du système et ses **réussites** passées (e.g., expériences précédentes avec la technologie).

---

<sup>6</sup> De l'anglais *self-efficacy* que Luminet décrit comme « *les croyances des individus dans leurs capacités à produire des actions qui vont à leur tour avoir une influence sur leur vie. Les individus qui ont un sens élevé de self-efficacy évaluent les tâches difficiles auxquelles ils font face comme des défis à maîtriser plutôt que comme des situations menaçantes à éviter.* » (p.218)

**Tableau 1. Facteurs d'influence caractéristiques du système et de l'utilisateur d'après la norme ISO 9241-210, 2009 (notre traduction)**

<b>Facteurs d'influence de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Image de la marque	Réputation, célébrité, prix bas, catégorie de produit
Présentation	Pertinence, personnalisation, format, qualité d'image
Fonctionnalité	Gestion, affichage, navigation
Performance	Vitesse de réponse, capacité de mémoire, puissance
Comportement interactif	Type d'interaction, retour visuel, dialogue interactif, gestion des erreurs
Croyances	Auto-efficacité, technophilie
Préférences	Esthétique, technologique, linguistique, type d'activité
Réussites	Expériences précédentes avec la technologie

Pour Alben (1996), le **procédé de conception**, la **compréhension et la traduction des besoins** utilisateurs dans le système influencent l'UX (Tableau 2). Dans le « procédé de conception », il inclut tous les aspects relatifs aux méthodologies utilisées, la résolution des problèmes rencontrés, la bonne réflexion et exécution du procédé conduisant au produit fini. Par « compréhension des besoins utilisateurs », il entend tout ce qui dans le système témoigne de la bonne compréhension des attentes et besoins (e.g., compétences, popularité, stimulation, sens, sécurité, autonomie) des utilisateurs.

**Tableau 2. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Alben, 1996 (notre traduction)**

<b>Facteurs d'influence de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Compréhension et traduction des besoins utilisateurs	Compétences, popularité, stimulation, sens, sécurité, autonomie
Procédé de conception efficace	Méthodologies utilisées, résolution des problèmes rencontrés, bonne réflexion et exécution du procédé

Mahlke (2008) ainsi que Hassenzahl & Tracktinsky (2006) établissent des liens entre l'expérience utilisateur et les facteurs extérieurs qui l'influencent (Tableau 3). Malhke identifie les **propriétés du système**, les **caractéristiques de l'utilisateur** et les **paramètres du contexte** comme facteurs d'influence. Les **propriétés du système** désignent les différentes solutions concernant les aspects d'entrée (e.g., technologie d'interaction) et de sortie (e.g., contenu visuel, feedback sensoriel). Les **caractéristiques de l'utilisateur** désignent par exemple sa capacité de mémorisation, son habileté verbale, sa personnalité, etc. Enfin, le **contexte** désigne principalement les aspects organisationnels, la signification de l'activité, l'environnement, etc. Hassenzahl et Tracktinsky définissent l'UX comme « *la conséquence de l'état interne de l'utilisateur (e.g., prédispositions, attentes, besoins, motivations, humeur, etc.), des caractéristiques du système (e.g., complexité, objectif, utilisabilité, fonctionnalité, etc.) et du contexte (ou environnement) dans lequel ont lieu les interactions* » (p.95), identifiant ainsi, comme Mahlke, les trois principaux facteurs d'influence relatifs à l'utilisateur, au système et au contexte. Arhipainen et Tähti (2003)

ajoutent deux catégories supplémentaires à ces trois facteurs : les **facteurs sociaux** (e.g., pression liée au temps, au succès ou à l'échec, désirabilité sociale, contrainte explicite et implicite, etc.) et **culturels** (e.g., habitudes, religion, symbole, langage, etc.) (Tableau 3).

**Tableau 3. Facteurs d'influence caractéristiques du système, de l'utilisateur et du contexte d'après Mahlke, 2008, Hassenzahl et Tractinsky, 2006, Arhipainen et Tähti, 2003 (notre traduction)**

<b>Facteurs d'influence de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Propriétés du système	Complexité, objectif, utilisabilité, fonctionnalité, conception des entrées, sorties
Caractéristiques de l'utilisateur	Prédispositions, attentes, besoins, motivations, humeur
Paramètres du contexte	Organisationnel, valeur de l'activité, environnement
Facteurs sociaux	Pression liée au temps, pression liée au succès ou à l'échec, désirabilité sociale, contrainte explicite et implicite
Facteurs culturels	Habitudes, religion, symbole, langage

Dans le domaine des environnements multimédia interactifs distribués, Wu et al. (2009) se focalisent particulièrement sur les facteurs du système qu'ils regroupent dans la notion de « qualité de service » et qu'ils définissent comme « *la capacité du système à fournir un service conforme à des exigences en matière de temps de réponse et de bande passante* » (Tableau 4). Ils établissent par ailleurs un lien entre la qualité de service et la qualité de l'expérience utilisateur. Ils considèrent ainsi la première comme un ensemble de facteurs de **vivacité**, d'**interactivité** et de **cohérence** de l'environnement, impactant la seconde. En outre, la **vivacité** regroupe la quantité et la qualité des informations sensorielles présentées à l'utilisateur (i.e., nombre de canaux sensoriels, et leur résolution) tandis que l'**interactivité** regroupe plutôt les éléments participant à la modification de la forme et du contenu de l'environnement (e.g., délai, niveau de contrôle offert à l'utilisateur, capacité d'adaptation aux changements opérés). Enfin, la **cohérence** correspond à la synchronisation, notamment temporelle et spatiale, de la communication des différents contextes de l'environnement à l'utilisateur.

**Tableau 4. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Wu et al., 2009 (notre traduction)**

<b>Facteurs d'influence de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Vivacité	Quantité et qualité des canaux sensoriels
Interactivité	Délai, niveau de contrôle offert à l'utilisateur, capacité d'adaptation aux changements opérés
Cohérence	Synchronisation temporelle, spatiale

### 3.2 Composants de l'expérience utilisateur

Dans sa définition générique, la norme ISO 9241-210 (voir 2.1) propose des composants qui déterminent directement l'UX (Tableau 5). Nous citons les quatre principaux :

- les **perceptions** personnelles et subjectives (e.g., utilisabilité<sup>7</sup>, accessibilité, utilité, etc.), qui représentent le point de contact de l'utilisateur avec le système grâce à ses sens (e.g., visuels, tactiles, sonores, ...);
- ses **réponses** physiques (e.g., activité motrice, posture, réflexe, respiration) ou psychologiques (e.g., stress, inhibition, bien-être, etc.);
- ses **émotions** (e.g., joie, peur, surprise, etc.);
- ses **comportements** (e.g., évitement, confrontation, etc.) qui traduisent, par des réactions observables, son état interne lors de l'interaction avec le système interactif.

**Tableau 5. Composants de l'UX d'après la norme ISO 9241-210, 2009 (notre traduction)**

Composants de l'UX	Indicateurs
Perceptions	Utilisabilité, accessibilité, utilité
Réponses	Activité motrice, posture, réflexe, respiration, anxiété, stress, inhibition, bien-être
Émotions	Joie, peur, surprise
Comportements	Évitement, confrontation

Selon Alben (1996), une solution exhaustive de design interactif contribue à une bonne qualité d'expérience et nécessite de répondre à huit qualités (Tableau 6). Ainsi, l'utilisateur devrait percevoir un système bien conçu comme **apprenable et utilisable**. Facile à apprendre et à utiliser, ce dernier requiert peu de temps et d'efforts pour l'apprentissage des fonctionnalités avec ses caractéristiques et son but faciles à cerner, d'autant qu'il est accessible aux utilisateurs de tous niveaux d'expérience. Le système doit également être **nécessaire ou désiré**, c'est-à-dire qu'il vient satisfaire une nécessité, un désir ou apporte une contribution (e.g., conduit à l'autonomie, améliore les compétences). **Flexible**, il s'adapte aux besoins et préférences des individus et des différents groupes, en plus de disposer d'une capacité d'évolution lui permettant de s'adapter à de nouveaux usages, potentiellement imprévus. Ce système **maniab**le, supporte tout le contexte d'utilisation dans son ensemble (e.g., installation, entraînement, maintenance, variation du prix, approvisionnement, etc.). Tout à fait **approprié**, pour résoudre le bon problème au bon niveau, ce système procure enfin une bonne **expérience esthétique**; il plaît, de par son design cohérent d'un point de vue à la fois graphique, interactif, de l'information, industriel et du point de vue de son style.

<sup>7</sup>L'utilisabilité est un composant qui peut être considéré sous l'angle du système ou de l'utilisateur (Bevan, 2009). Par exemple pour Hassanzahl et Tractinsky (voir 3.1) l'utilisabilité est une caractéristique du système alors que pour Alben (voir 3.2) elle est une perception de l'utilisateur.

**Tableau 6. Six composants de la qualité de l'expérience d'après Alben, 1996 (notre traduction)**

Composants de l'UX	Indicateurs
Apprenable et utilisable	Requiert peu de temps et d'efforts pour l'apprentissage des fonctionnalités, facilité à cerner les caractéristiques du système, facilité du système à suggérer son but, facilité d'accessibilité des utilisateurs de tous niveaux d'expérience
Nécessaire ou désiré	Conduit à l'autonomie, améliore les compétences
Flexible	Adaptabilité du produit aux besoins et préférences des individus et des différents groupes, capacité d'évolution du produit pour s'adapter à de nouveaux usages potentiellement imprévus
Maniable	Supporte les installations, l'entraînement, la maintenance, la variation du prix, l'approvisionnement
Approprié	Résolution du bon problème au bon niveau
Expérience esthétique	Esthétique plaisante, design cohérent

L'architecte de l'information Peter Morville (2004), cité dans plusieurs recherches pour ses travaux en design interactif (Jeong et al., 2016 ; Moran et al., 2015 ; Morville & Sullenger, 2010 ; Pereira et al., 2010), propose sept composants constituant l'UX. A travers ces derniers, Morville veut présenter une ligne directrice pour créer une qualité d'expérience satisfaisante sur un site internet (Tableau 7). Ainsi, selon lui, pour qu'un système soit **utile**, en permettant l'autonomie, ou en augmentant les performances par exemple, il doit définir des solutions innovantes qui répondent à un besoin précis. Pour être **désirable**, agréable le système doit inclure des éléments de design émotionnel, utiliser le pouvoir de l'image, de l'identité de la marque pour susciter l'émotion et l'appréciation de l'utilisateur. Quant à son **accessibilité** caractérisée par une police optimisée pour la synthèse vocale, et une option braille, le système y parvient en proposant des options pour les personnes ayant un handicap qui représentent plus de 10% de la population française. Le système doit également être **crédible** en termes de précision de l'information, et de cohérence de design et d'architecture, c'est-à-dire aider l'utilisateur à croire et à avoir confiance dans le système. Ce dernier doit être facilement **localisable**, soit permettre à l'utilisateur de trouver ce qu'il cherche autant dans la navigation que dans la localisation du site internet. Malgré l'exigence de facilité d'utilisation du système, l'auteur indique toutefois que son **utilisabilité** est nécessaire sans être suffisante. Enfin, l'information fournie par le système doit avoir de la **valeur** d'un point de vue éthique et écologique aux yeux de l'utilisateur. Elle doit notamment faire avancer la cause et la mission du site internet en se répercutant dans son expérience.

**Tableau 7. Recommandations pour une bonne expérience utilisateur des sites internet d'après Morville, 2004 (notre traduction)**

Composants de l'UX	Indicateurs
Utile	Rend autonome, indique le chemin, augmente les performances
Désirable	Recherché, agréable, plaisant
Accessible	Police optimisée pour la synthèse vocale, option braille
Crédible	Information juste, design et architecture cohérents
Localisable	Navigation facile, localisation du site internet
Utilisable	Facile à utiliser
Valeur ajoutée	Éthique, écologique, respect

Hassenzahl (2001) propose cinq composants (Tableau 8) qui déterminent l'UX pour les systèmes interactifs : les **qualités hédoniques** et **ergonomiques**, l'**attractivité**, les **conséquences comportementales** et **émotionnelles**. Les **qualités hédoniques** sont composées des dimensions qui ne sont pas liées à une tâche mais à un jugement qui repose sur le potentiel du système à stimuler, donner un sentiment de contrôle, conférer une certaine popularité, procurer de la satisfaction dans un souci d'originalité et d'innovation inscrite dans l'ère du temps. Au sein des **qualités ergonomiques** sont regroupées les dimensions liées aux aspects instrumentaux du système et celles qui répondent aux besoins de sécurité et de contrôle de l'utilisateur. L'**attractivité**, le troisième composant, désigne le jugement global du système (fonctionnant en mode binaire avec deux modalités : bon ou mauvais) découlant des qualités perçues. Les **conséquences comportementales** (e.g., fréquence d'usage, rejet, adoption, etc.) surviennent après appréciation du système et peuvent se manifester sous la forme d'un accroissement de l'usage ou d'un rejet du système. Les **conséquences émotionnelles** (e.g., joie, plaisir, satisfaction, surprise, frustration, déception, etc.) désignent les sentiments éprouvés par l'utilisateur pendant ou après l'usage.

**Tableau 8. Cinq composants de l'expérience utilisateur d'après Hassenzahl, 2001 (notre traduction)**

Composants de l'UX	Indicateurs
Qualités hédoniques	Originalité, innovant, à la mode
Qualités ergonomiques	Utilisabilité, clarté, structure
Attractivité	Bon, mauvais
Conséquences comportementales	Fréquence d'usage, rejet, adoption
Conséquences émotionnelles	Sentiment de joie, de plaisir, de satisfaction, de surprise, de frustration, de déception

Mahlke (2008) propose également cinq composants de l'UX pour évaluer les interactions homme-technologie (Tableau 9) :

- l'**interaction** dont les caractéristiques sont par exemple le taux de réalisation de la tâche et sa durée de réalisation ;
- les **qualités instrumentales** qui sont associées à une tâche et à un but que l'utilisateur souhaite accomplir, sont principalement définies à travers l'utilité et l'utilisabilité d'un système ;
- les **qualités non-instrumentales**, liées aux aspects qui ne sont ni objectifs, ni purement fonctionnels du système, comme par exemple les aspects esthétiques (e.g.,

visuels, haptiques, acoustiques), symboliques (e.g., communicatifs, associatifs) et la motivation ;

- les **réactions émotionnelles** comme déterminants de l'UX, qui résultent d'un phénomène complexe organisé au cours duquel chaque étape (i.e., le ressenti subjectif, l'évaluation cognitive, les tendances comportementales, les réactions physiologiques, les expressions motrices) a une fonction émotionnelle spécifique ;
- les **conséquences de l'UX** qui incluent le jugement global (e.g., acceptation, évaluation positive) du système, le comportement lié à l'utilisation (e.g., intention d'utiliser le système) et le choix d'une alternative lorsque plusieurs systèmes fonctionnent avec le même objectif.

**Tableau 9. Cinq composants de l'expérience utilisateur d'après Mahlke, 2008 (notre traduction)**

<b>Composants de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Interaction	Taux de réalisation de la tâche, la durée pour réaliser une tâche
Qualités instrumentales	Utilité, utilisabilité (i.e., qui est efficient, contrôlable, aidant, apprenable)
Qualités non-instrumentales	Aspects esthétiques (i.e., visuels, acoustiques), aspects symboliques (i.e., communicatifs, associatifs), aspects haptiques (i.e., toucher).
Réactions émotionnelles	Ressenti subjectif, évaluation cognitive, tendances comportementales, réactions physiologiques, expressions motrices
Conséquences de l'UX	Acceptation, évaluation positive, intention d'utiliser le système, choix d'une alternative

Wu et al. (2009) proposent six composants pour évaluer la qualité d'expérience des environnements multimédias interactifs distribués (Tableau 10) :

- le **flow** qui est une sensation holistique à la fois de concentration et de divertissement ressentie par les personnes lorsqu'elles agissent avec une implication entière ;
- la **téléprésence** identifiée comme la perception d'être réellement présent dans l'environnement distribué ;
- l'**acceptation** correspond aux perceptions de facilité d'utilisation, d'utilité et les attitudes envers la technologie ;
- les **gains de performance** qui représentent l'amélioration des performances de l'utilisateur dans une certaine tâche ;
- les **comportements d'exploration** qui désignent l'attitude spontanée de l'utilisateur lorsque aucun but, ni aucune conduite particulière ne lui sont dictés ;
- l'**adoption** qui représente l'intention d'usage et l'usage actuel de la technologie.

**Tableau 10. Six composants de l'expérience utilisateur d'après Wu et al., 2009 (notre traduction)**

Composants de l'UX	Indicateurs
Flow	Implication totale, concentration, divertissement
Téléprésence	Présent dans l'environnement distribué
Acceptation de la technologie	Utilité perçue, facilité d'utilisation
Gains de performance	Amélioration des performances
Comportement d'exploration	Exploration spontanée
Adoption de la technologie	Intention d'utiliser, usage réel

Takatalo et al. (2010) proposent trois composants principaux et quinze sous-composants qui spécifient l'expérience utilisateur dans les jeux numériques (Tableau 11) :

- le premier composant qui intègre six sous-composants décrits ci-après est la **présence**, décrite comme la perception cognitive spatiale et sociale, et l'attention portée à l'environnement du jeu ;
- le deuxième composant principal est l'**implication**, qui constitue une mesure de la motivation selon les auteurs, il intègre deux sous-composants ;
- le troisième composant principal est le **flow**, une évaluation subjective cognitive et émotionnelle du jeu, sept sous-composants le constituent.

Les six sous-composants de la **présence** sont :

- la **présence physique** qui désigne le sentiment d'être dans un environnement réel et vivant ;
- l'**attention** qui désigne la distorsion du temps et la concentration de l'utilisateur vers l'environnement du jeu plutôt que vers l'environnement physique ;
- la **co-présence** qui renvoie au sentiment de partager un environnement avec d'autres tout en y étant actif ;
- l'**engagement** dans le rôle décrit comme le sentiment d'être transporté dans l'histoire et d'être captivé par le rôle attribué dans le scénario ;
- l'**excitation** est l'état actif, éveillé et stimulé de l'utilisateur dans le jeu ;
- l'**interaction** caractérisée par la rapidité, la variété, la configuration, l'exploration et la prévisibilité des actions de l'utilisateur dans l'environnement du jeu.

Deux sous-composants sont attribués à l'**implication** :

- l'**intérêt** lié à la valeur du jeu pour l'utilisateur (e.g., passionnant)
- l'**importance** liée au sens, à la pertinence, à la façon dont l'utilisateur se sent proche du jeu

Les sept sous-composants du **flow** sont :

- le **défi**, qui provoque chez l'utilisateur l'envie de surpasser ses capacités ;
- la **compétence**, le sentiment d'efficacité personnelle de l'utilisateur ;
- la **valence hédonique** qui est un sous-composant à deux pôles qui tend vers le plaisir d'un côté et le déplaisir de l'autre (e.g., contentement/désolation) ;

- le **divertissement** qui qualifie un ressenti plaisant et spécial qui donne envie à l'utilisateur de jouer ;
- l'**esprit récréatif** qui désigne la « facilité de faire » ressentie en état de flow par l'utilisateur ;
- le **contrôle** qui renvoie à la dominance et l'indépendance de l'utilisateur dans le jeu ;
- l'**effet impressionnant** procuré par le jeu c'est-à-dire l'étonnement, la stupéfaction envers le jeu est le septième sous-composant du flow.

**Tableau 11. Trois composants et quinze sous-composants de l'expérience utilisateur d'après Takatalo et al., 2010 (notre traduction)**

<b>Composants de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Présence	Perception cognitive spatiale et sociale, attention portée à l'environnement
Présence physique	Sentiment d'être dans un environnement réel et vivant
Attention	Distorsion du temps, concentration visuelle sur l'environnement du jeu plutôt que sur l'environnement réel
Co-présence	Sentiment de partager un environnement avec un autre
Engagement dans le rôle	Être transporté par l'histoire, captivé par le rôle dans le scénario
Charge émotionnelle	Etat actif, éveillé, stimulé
Interaction	Rapidité, variété, configuration, exploration, prévisibilité des actions
Implication	Mesure de la motivation
Intérêt	Sentiment que le jeu est passionnant
Importance	Qui a du sens, de la pertinence, qui permet de se sentir proche
Flow	Evaluation subjective cognitive et émotionnelle du jeu
Défi	Tâche qui crée chez l'utilisateur un besoin de surpasser ses capacités
Compétence	Sentiment d'efficacité personnelle
Valence hédonique	Plaisir/déplaisir, contentement/désolation
Divertissement	Ressenti plaisant, spécial qui permet de s'adonner au jeu
Esprit récréatif	« Facilité de faire » ressentie en état de flow
Contrôle	Dominant et indépendant dans le jeu
Effet impressionnant	Etonnement, stupéfaction

En ergonomie des technologies émergentes couplant les Interfaces Cerveau-Ordinateur (ICO) et les environnements virtuels, Loup-Escande et Lécuyer (2014) se sont inspirés d'une étude approfondie de la littérature scientifique pour proposer une méthodologie d'évaluation d'UX de ces systèmes.

Six composants ont été identifiés (Tableau 12) :

- l'**utilité** associée au besoin de l'utilisateur ;
- les **qualités hédoniques** qui sont des représentations du ressenti subjectif de l'utilisateur ;
- l'**attractivité** comme jugement global (e.g., bon, mauvais) du système ;
- l'**utilisabilité** qui se réfère au sentiment selon lequel l'utilisateur pense avoir atteint son but (efficience), tout en réalisant sa tâche avec le moindre effort (efficacité), en s'y

adaptant rapidement (apprentissage), en étant capable de réutiliser le système après un temps de pause (mémorisation) et en étant affecté par la tâche positivement, de façon neutre ou négativement (satisfaction) ;

- le **sentiment de présence** qui représente le sentiment d'être réellement présent dans l'environnement virtuel plutôt que dans l'environnement réel ;
- les **émotions résultantes** (e.g., joie, peur, tristesse, colère, frustration, etc.) qui sont une conséquence émotionnelle après appréciation du système.

**Tableau 12. Six composants de l'expérience utilisateur d'après Loup-Escande & Lécuyer, 2014 (notre traduction)**

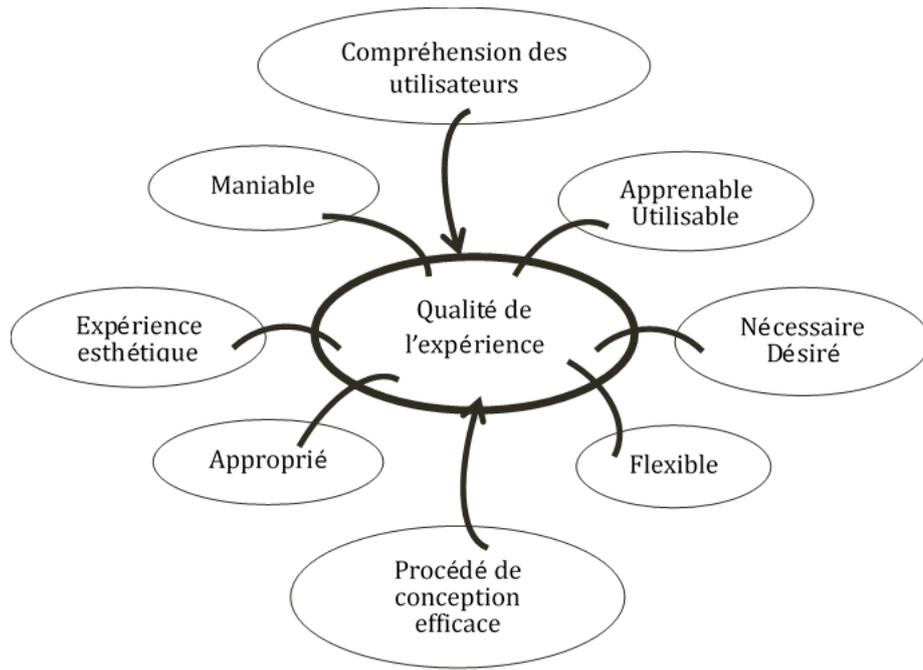
<b>Composants de l'UX</b>	<b>Indicateurs</b>
Utilisabilité	Sentiments d'efficacité, d'apprentissage, de mémorisation, et de satisfaction
Utilité	Répond au besoin d'autonomie, de progression
Qualités hédoniques	Originalité, innovativité
Attractivité	Jugement global du produit. (i.e., bon ou mauvais)
Sentiment de présence	Sentiment d'être réellement présent dans le monde virtuel
Emotions résultantes	Joie, peur, tristesse, colère, frustration

### 3.3 Modèles de l'expérience utilisateur

Plusieurs représentations et approches de l'UX ont été développées pour aider à mieux faire comprendre et à faire adopter ce concept. Ces contributions proviennent de plusieurs domaines tels que le design interactif, l'architecture de l'information, l'interaction homme-machine, etc. Elles examinent l'UX sous différents angles. Nous avons identifié deux approches : les approches centrées *produit* et celles centrées *utilisateur*.

#### 3.3.1 Modèles de l'expérience utilisateur centrés produit

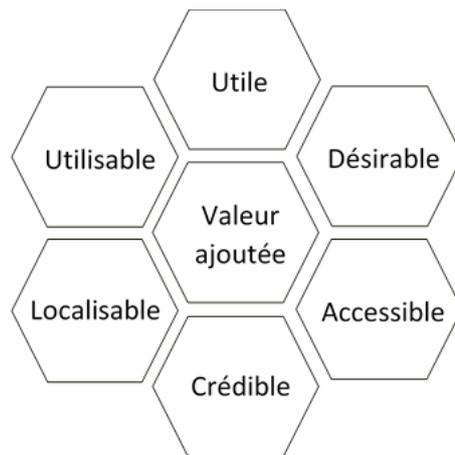
Les modèles centrés *produit* proposent des critères de conception, de design et d'évaluation pour assister les professionnels ou non-professionnels dans le développement d'un système afin que celui-ci procure une expérience satisfaisante à l'utilisateur. Les modèles de la qualité d'expérience d'Alben (1996) et de Morville (2004) ont ainsi contribué à faire adopter les critères pour créer une bonne UX lors de la conception d'un système à un grand nombre de personnes. Alben (1996) est l'une des premières à proposer un modèle d'UX centré *produit* (Figure 2), qui met à disposition les huit critères nécessaires pour développer un système offrant une bonne qualité d'expérience (e.g., le système doit être approprié au bon besoin au bon niveau). Il regroupe 6 composants déterminant l'UX (i.e., apprenable et utilisable, nécessaire ou désiré, flexible, maniable, approprié, expérience esthétique) et 2 facteurs l'influençant (i.e., compréhension et traduction des besoins utilisateurs, procédé de conception efficace).



**Figure 2. Modèle de la qualité d'expérience de Alben, 1996 (notre traduction)**

Morville (2004) propose également un modèle de l'UX centré *produit* (Figure 3) qu'il nomme « le nid d'abeille de l'expérience utilisateur<sup>8</sup> » constitué de sept composants (i.e., utile, désirable, accessible, crédible, localisable, utilisable, valeur ajoutée). Il nomme ainsi son modèle, en référence à la contribution de chacun des composants du modèle à l'UX, tout en étant connectés les uns aux autres. Dans le domaine du design émotionnel, Norman (2004) met par exemple en évidence un lien étroit entre utilisabilité et esthétique (i.e., désirabilité). Fogg et Tseng (1999), quant à eux, démontrent le lien entre le design visuel (i.e., désirabilité) de l'interface (e.g., couleur, mise en page, etc.) et la crédibilité. De façon analogue au modèle d'Alben (1996), ce modèle est une proposition de sept critères servant à assister les concepteurs dans la phase de développement du système. Ces modèles permettent d'intégrer des solutions qui répondent au mieux aux attentes, envies et valeurs des utilisateurs.

<sup>8</sup> Traduction de “*the user experience honeycomb*”

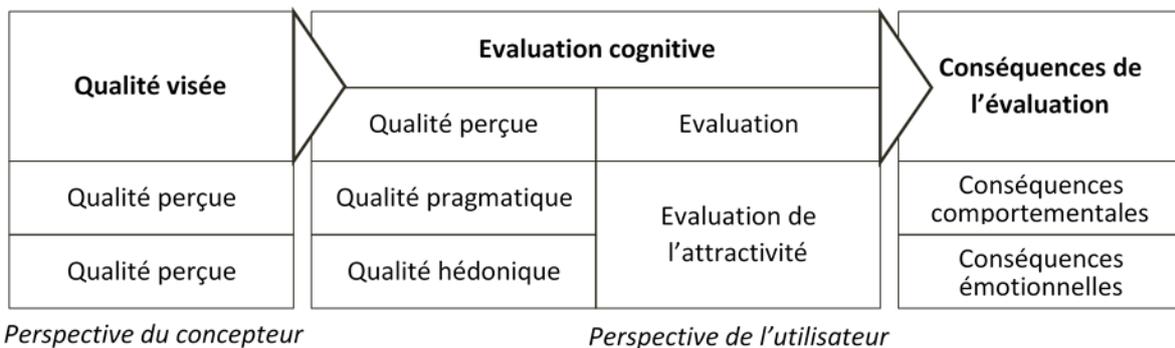


**Figure 3. Modèle de la qualité d'expérience de Morville, 2004 (notre traduction)**

### 3.3.2 Modèles de l'expérience utilisateur centrés utilisateur

Les modèles centrés *utilisateur* proposent d'aider les concepteurs et développeurs à mieux comprendre les utilisateurs des systèmes qu'ils élaborent. Ainsi ces modèles intègrent des concepts de différentes disciplines (e.g., biologie, sciences cognitives, neurosciences, etc.) relatives aux actions et aux aspects de l'UX jugées pertinentes aux yeux de l'utilisateur lorsqu'il interagit avec un système. A titre d'exemple, Hassenzahl (2001) propose un modèle théorique qui présente l'UX selon deux perspectives : celle du concepteur et celle de l'utilisateur. Le concepteur implémente différents éléments du système (e.g., le contenu, le style de présentation, les fonctionnalités, le style interactionnel) de manière à provoquer une qualité pragmatique et une qualité hédonique positives chez l'utilisateur.

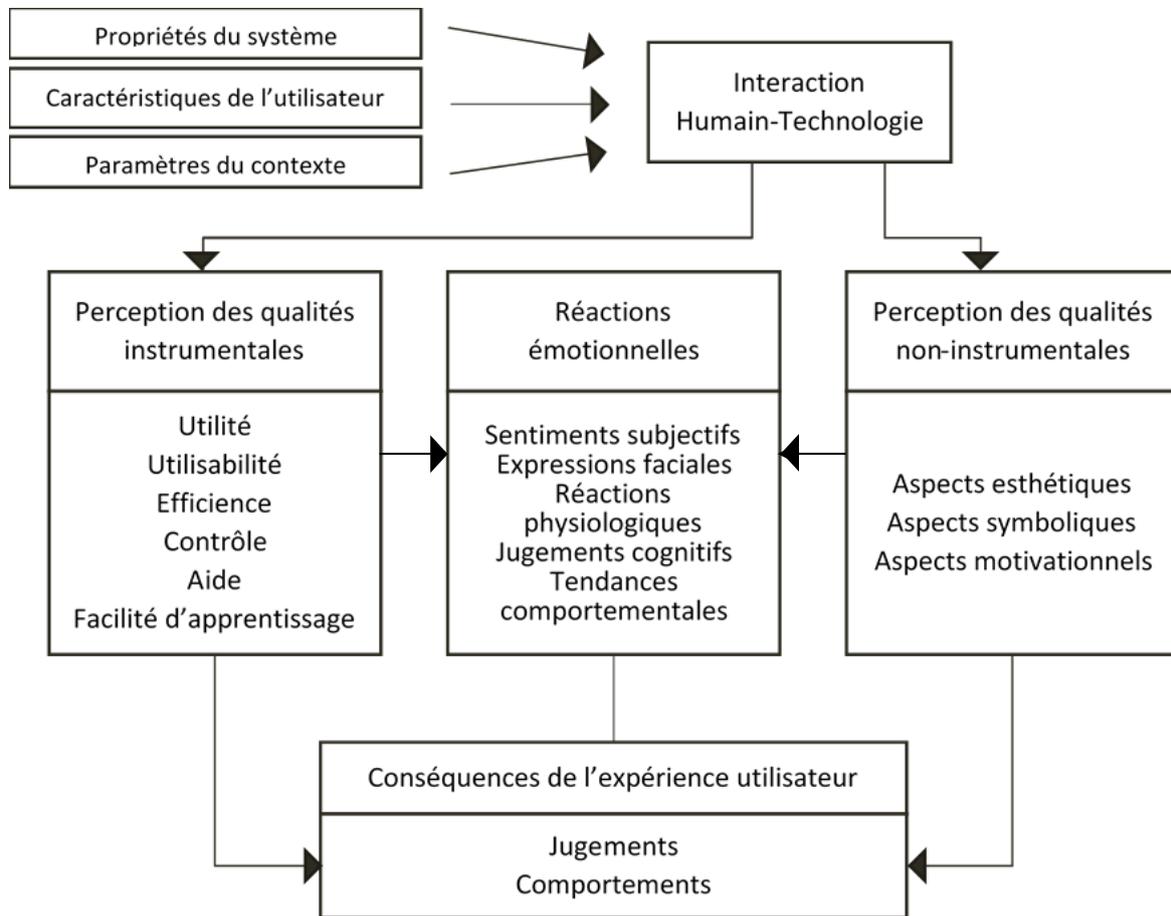
L'utilisateur interagit avec un système et perçoit une UX à travers cinq composants que Hassenzahl (2001) caractérise en qualité hédonique et en qualité ergonomique qui emmènent simultanément l'utilisateur à poser un jugement d'attractivité, déterminant par la suite les comportements et émotions qui en résulteront (Figure 4).



**Figure 4. Modèle théorique de l'expérience utilisateur de Hassenzahl, 2001 (notre traduction)**

Comme Hassenzahl (2001), Mahlke (2008) propose un modèle d'UX centré *utilisateur*, le « Components of User Experience Model<sup>9</sup> » (CUE-Model) pour les systèmes interactifs composé de huit composants (i.e., propriétés du système, caractéristiques de l'utilisateur, paramètres du contexte, interaction, qualités instrumentales, qualités non-instrumentales, réactions émotionnelles, conséquences de l'UX). Ce modèle caractérise l'expérience utilisateur comme étant les perceptions des qualités instrumentales (telles que l'utilité, l'utilisabilité) et des qualités non-instrumentales (telles que l'esthétique, la motivation, etc.) qui simultanément vont influencer les réactions émotionnelles de l'utilisateur.

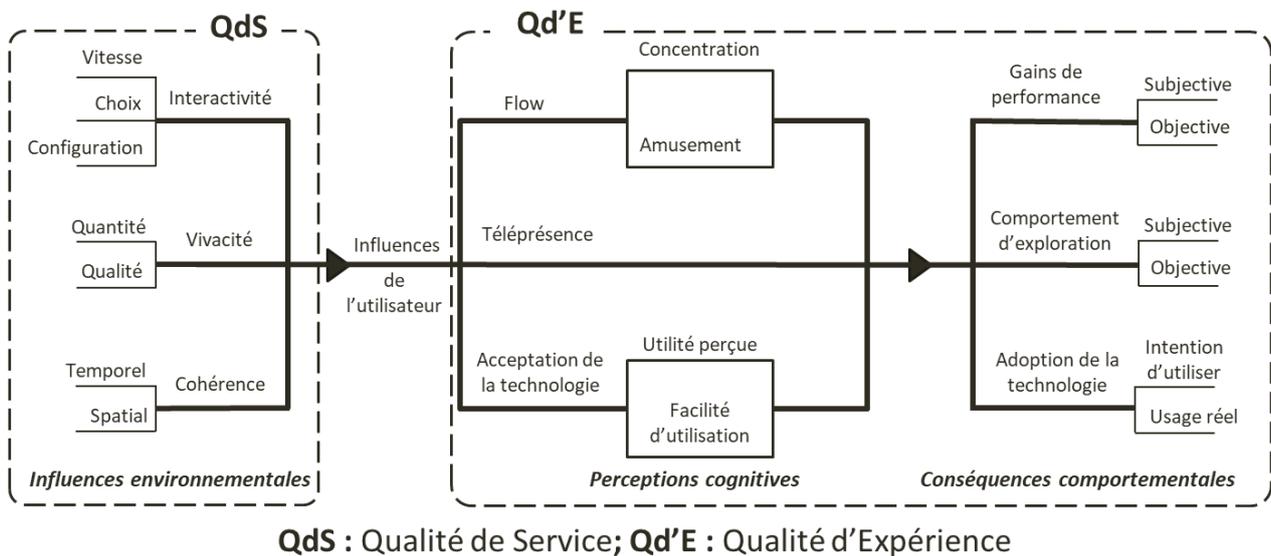
Ces perceptions instrumentales, non-instrumentales et les réactions émotionnelles de l'utilisateur vont déterminer, par la suite, les conséquences de l'expérience utilisateur en termes de jugement et d'alternative. Selon Mahlke (2008), les perceptions des qualités instrumentales et non-instrumentales sont influencées par l'interaction entre l'humain et la technologie qui est, elle-même, influencée par les facteurs d'influence du système, de l'utilisateur et du contexte (Figure 5).



**Figure 5. Modèle d'expérience utilisateur de Mahlke, 2008 (notre traduction)**

<sup>9</sup> Traduction : Le modèle de composants de l'expérience utilisateur

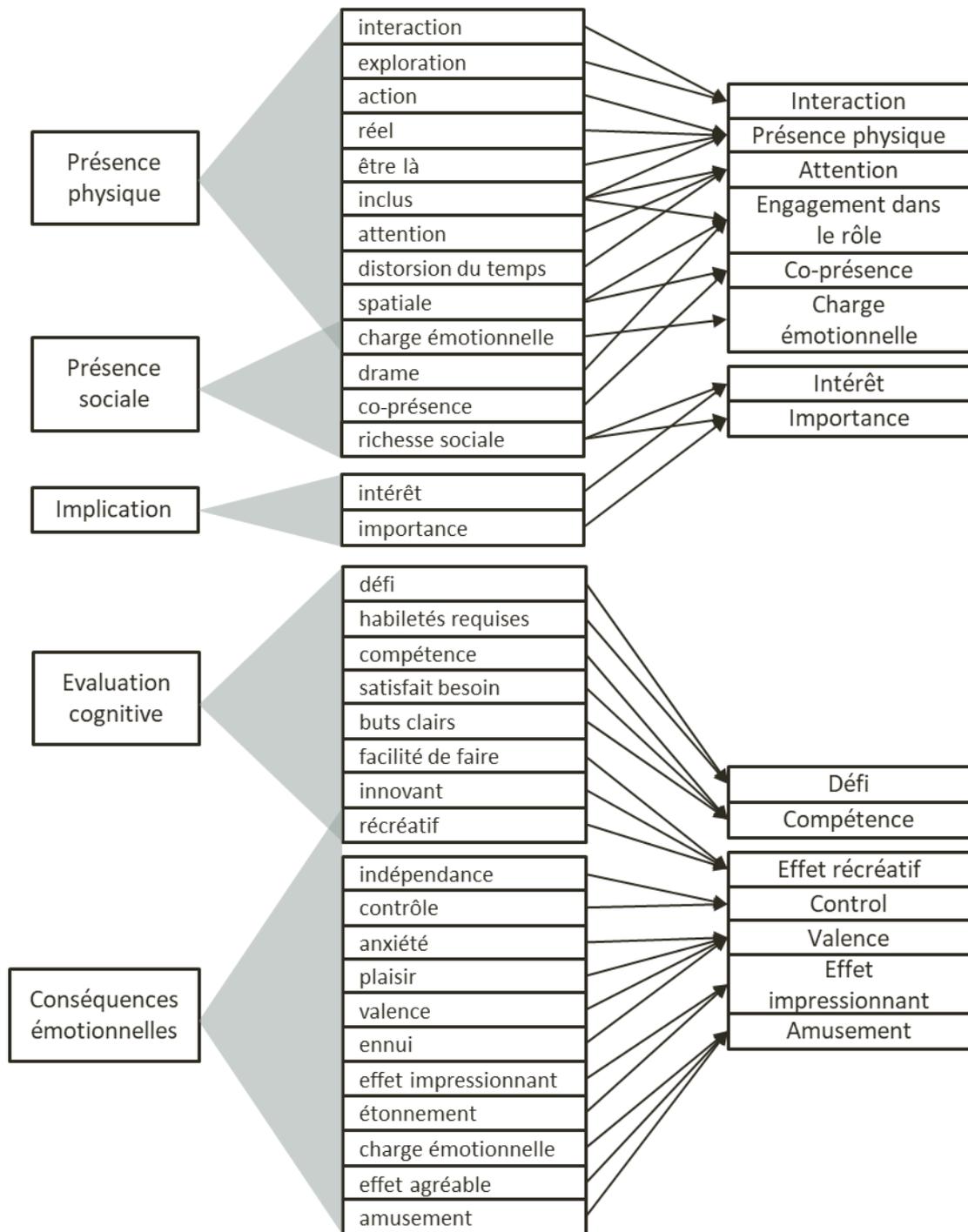
Aux dimensions cognitives, qu'ils caractérisent par le flow, la téléprésence et l'acceptation de la technologie, Wu et al. (2009) ajoutent les réponses comportementales identifiées à travers les gains de performance, les comportements d'exploration et l'adoption de la technologie. Ces auteurs étendent ainsi l'expérience utilisateur à des dimensions subjectives et objectives (Figure 6). Ces dernières sont influencées par les caractéristiques de l'environnement et ceux de l'utilisateur, et elles influencent à leur tour les réponses comportementales.



**Figure 6. Modèle de la qualité d'expérience de Wu et al., 2009 (notre traduction)**

Takatalo et al. (2010) présentent leur modèle multidimensionnel d'UX, *Presence, Involvement and Flow Framework*<sup>10</sup> (PIFF) inspiré du domaine de la psychologie (Figure 7). Pour aider à mieux comprendre l'expérience des personnes avec les jeux numériques sur ordinateur, leur modèle se base sur les concepts de présence (i.e., présence physique, présence sociale), d'implication et de flow (i.e., évaluation cognitive, conséquences émotionnelles). Selon les auteurs, la présence et l'implication sont à l'origine de la phase d'adaptation des joueurs, qui symbolise la façon dont ces derniers entretiennent volontairement un lien avec le jeu (e.g., fréquence d'utilisation, ressemblance avec l'avatar). Ces deux composants sont également fondamentaux dans l'évaluation de l'interface et du scénario du jeu. Ces derniers provoquent en effet une sensation d'environnement et d'interaction sociale réelle chez le joueur, ce qui le motive et l'implique directement dans cet environnement. En parallèle, le joueur est en constante évaluation des différents mécanismes (e.g., interaction, présentation du contenu, réactivité) se rapportant au jeu. Jugé comme étant une caractéristique du flow selon les auteurs, ce processus de métacognition (i.e., évaluation de ses propres capacités) et des défis proposés par le jeu affecte l'état émotionnel du joueur et de fait, l'UX.

<sup>10</sup> Structure de Présence, Implication et Flow



**Figure 7. Modèle multidimensionnel de l'expérience utilisateur de Takatalo et al., 2010 (notre traduction)**

### 3.4 Synthèse des composants de modèles de l'UX

Cette synthèse présente les composants issus des modèles :

- de la qualité d'expérience (Alben, 1996) ;
- de l'expérience utilisateur (Hassenzahl, 2001) ;
- du nid d'abeille de l'expérience utilisateur (Morville, 2004) ;
- des composants de l'expérience utilisateur (CUE-Model) (Mahlke, 2008) ;
- de la qualité de service et de la qualité de l'expérience (Wu, 2009) ;
- multidimensionnel de l'expérience utilisateur (Takatalo, 2010).

Les composants de ces modèles présentent certaines similarités. Dans le tableau de synthèse ci-dessous (Tableau 13) chaque composant (voir **Composants** dans le tableau) et les composants d'autres modèles similaires à ce dernier (voir **Autres composants partageant des similitudes** dans le tableau) sont présentés. La colonne **Similarité** indique le lien de similitude entre les composants présentés sur la même ligne (e.g., A est un indicateur de B ou A et B partagent la même définition).

**Tableau 13. Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Autres composants partageant des similitudes	Similarité
Modèle de la qualité d'expérience (Alben, 1996)	Apprenable et utilisable	Qualités ergonomiques (Hassenzahl, 2001) ; utilisable (Morville, 2004) ; qualités instrumentales (Mahlke, 2008)	L'apprenabilité et l'utilisabilité sont des indicateurs de la qualité instrumentale et ergonomique ; l'utilisabilité partage la même définition qu'utilisable
	Nécessaire (ou désiré)	Qualités ergonomiques (Hassenzahl, 2001) ; utile (Morville, 2004) ; Qualités instrumentales (Mahlke, 2008)	La notion de nécessité partage la même définition que celle d'utilité, ce sont des indicateurs de qualités ergonomiques et instrumentales
	Flexible		
	Approprié		
	Expérience esthétique	Qualités hédoniques (2001) ; Qualités non-instrumentales (Mahlke, 2008)	Les expériences esthétiques sont des indicateurs des qualités hédoniques et qualités non-instrumentales
	(Nécessaire ou) désiré	Désirable (Morville, 2004) ; Qualités hédoniques (2001) ; Qualités non-instrumentales (Mahlke, 2008)	La notion de désirabilité est un indicateur des qualités hédoniques et qualités non-instrumentales ; elle partage la même définition que désirable
	Maniable		
	<b>Facteurs</b>		
	Compréhension des utilisateur		
	Procédé de conception efficace		

**Tableau 13 (suite). Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

<b>Modèles</b>	<b>Composants</b>	<b>Autres composants partageant des similitudes</b>	<b>Similarité</b>
Modèle de l'expérience utilisateur (Hassenzahl, 2001)	Qualité hédonique	Qualités non-instrumentales (Mahlke, 2008) ; expérience esthétique (Alben, 1996)	Les qualités hédoniques partagent la même définition que les qualités non-instrumentales
	Qualité ergonomique	Qualités instrumentales (Mahlke, 2008) ; apprenable et utilisable (Alben, 1996) ; nécessaire ou désiré (Alben, 1996) ; utilisable (Morville, 2004) ; utile (Morville, 2004) ; désirable (Morville, 2004)	Les qualités ergonomiques partagent la même définition que les qualités instrumentales
	Attractivité	Conséquence de l'expérience (Mahlke, 2004)	L'attractivité est un indicateur des conséquences de l'expérience
	Conséquences comportementales	Conséquence de l'expérience (Mahlke, 2004)	Les conséquences comportementales sont un indicateur des conséquences de l'expérience
	Conséquences émotionnelles	Réactions émotionnelles de l'utilisateur (Mahlke, 2008)	Les conséquences émotionnelles partagent la même définition que les réactions émotionnelles

**Tableau 13 (suite). Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Composants similaires	Similarité
Le nid d'abeille de l'expérience utilisateur (Morville, 2004)	Accessible		
	Utilisable	Apprenable et utilisable (Alben, 1996) ; qualités ergonomiques (Hassenzahl, 2001) ; qualités instrumentales (Mahlke, 2008)	La notion d'utilisabilité partage la même définition que apprenable et utilisable, ce sont des indicateurs de la qualité instrumentale et ergonomique
	Crédible		
	Localisable		
	Valeur ajoutée		
	Désirable	(Nécessaire ou) désiré (Alben, 1996)	Désirable partage la même définition que désiré
	Utile	Nécessaire (ou désiré) (Alben, 1996)	Utile partage la même définition que nécessaire
	<b>Composants</b>		
Modèle des composants de l'expérience utilisateur (CUE-Model) (Mahlke, 2008)	Interaction	Interaction (Takatalo, 2010)	Définition commune
	Qualités instrumentales	Apprenable et utilisable (Alben, 1996) ; nécessaire (ou désiré) (Alben 1996) ; utilisable (Morville, 2004) ; utile (Morville, 2004) ; désirable (Morville, 2004) ; qualités ergonomiques (Hassenzahl, 2001) ;	Les qualités instrumentales regroupent les indicateurs d'utilisabilité et d'utilité, de nécessité ; elles partagent la même définition que les qualités ergonomiques
	Qualités non-instrumentales	Expérience esthétique (Alben, 1996) ; Qualités hédoniques (Hassenzahl, 2001)	Les qualités non-instrumentales partagent la même définition que les qualités hédoniques ; l'expérience esthétique est l'un de ses indicateurs
	Réactions émotionnelles	Conséquences émotionnelles (Hassenzahl, 2001)	Les réactions émotionnelles partagent la même définition que les conséquences émotionnelles
	Conséquences de l'expérience	Attractivité (Hassenzahl, 2001) ; conséquences comportementales (Hassenzahl, 2001)	Les conséquences de l'expérience regroupent les indicateurs d'attractivité et de conséquences comportementales

**Tableau 13 (suite). Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Composants similaires	Similarité
Modèle de la qualité de service et de la qualité de l'expérience (Wu, 2009)	Acceptation de la technologie	Conséquences comportementales (Hassenzahl, 2001) ; Conséquence de l'expérience (Mahlke, 2004)	L'acceptation de la technologie est un indicateur des conséquences comportementales, et un indicateur des conséquences de l'expérience
	Gains de performance	Interaction (Mahlke, 2008) ; Interaction (Takatalo, 2010)	Les mesures de gains de performances (e.g., temps de réalisation de la tâche) sont un indicateur de l'interaction
	Comportement d'exploration		
	Flow	Flow (Takatalo, 2010) ; divertissement (Takatalo, 2010)	Le flow regroupe l'indicateur du divertissement entre autres
	Téléprésence	Présence (Takatalo, 2010) ; Présence physique (Takatalo, 2010) ; Co-présence (Takatalo, 2010)	La téléprésence, la présence physique, la co-présence sont des indicateurs de la présence
	<b>Facteurs</b>		
	Vivacité		
	Interactivité		
Cohérence			

**Tableau 13 (suite). Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Composants similaires	Similarité
Modèle multidimensionnel de l'expérience utilisateur (Takatalo, 2010)	Présence	Téléprésence (Wu, 2009)	La présence regroupe l'indicateur de téléprésence entre autres
	Présence physique	Téléprésence (Wu, 2009)	La présence physique est un indicateur de la présence
	Attention		
	Co-présence	Téléprésence (Wu, 2009)	La co-présence est un indicateur de la présence
	Engagement dans le rôle		
	Charge émotionnelle	Conséquences émotionnelles (Hassenzahl, 2001) ; Réactions émotionnelles (Mahlke, 2008)	La charge émotionnelle est un indicateur des conséquences émotionnelles et des réactions émotionnelles
	Interaction	Interaction (Mahlke, 2008) ; Gains de performance (Wu, 2009)	L'interaction regroupe l'indicateur de gains de performances entre autres
	Implication		
	Intérêt		
	Importance		
	Flow	Flow (Wu, 2009)	Définition commune
	Défi		
	Compétence		
	Valence hédonique	Conséquences émotionnelles (Hassenzahl, 2001) ; Réactions émotionnelles (Mahlke, 2008) ; charge émotionnelle (Wu, 2009)	La valence hédonique et la charge émotionnelle sont des indicateurs des conséquences émotionnelles et des réactions émotionnelles
	Divertissement	Flow (Wu, 2009)	Le divertissement est un indicateur du flow
	Esprit récréatif		
	Contrôle		
Effet impressionnant			

## 4. Expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif : facteurs, composants et modèles

Dans un Environnement Virtuel Immersif (EVI), les stimuli sensoriels sont diffusés auprès de l'utilisateur à travers des dispositifs visuels, auditifs, tactiles ou kinesthésiques. Une Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif (IHEVI), qui reproduit en outre des informations sensorielles et corporelles particulièrement proche du réel, permet à l'utilisateur des actions ou activités plus naturelles qu'avec les systèmes interactifs homme-ordinateur habituels. Avec les fonctionnalités et les modes d'interactions qui en découlent, les caractéristiques de l'UX vont ainsi s'en retrouver modifiées. Les interfaces motrices et sensorielles associées à ces interactions nécessitent donc d'être conçues de manière à procurer des perceptions corporelles et intellectuelles, permises par l'EVI conformes aux attentes et besoins des utilisateurs. Ainsi, nous examinons ce qui constitue une expérience pour un utilisateur dans cette catégorie d'environnement virtuel. Nous identifions les facteurs d'influence et les composants clés isolément, ainsi que les modèles qu'ils composent, relatifs à UX en EVI.

### 4.1 Facteurs d'influence en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif

Lin et Parker (2007) proposent cinq caractéristiques du système qui influencent l'UX dans un EVI (Tableau 14), dont trois caractéristiques de l'image : le **champ de vision**, qui est la zone de visibilité de l'utilisateur (e.g., 180° à l'horizontale) ; la **vision stéréoscopique**, qui représente la projection en relief de la scène visuelle, et le **mouvement visuel** qui correspond au mouvement perçu par l'utilisateur lorsqu'il se déplace dans un environnement (ou lorsque l'environnement est mouvant). Le **niveau d'interactivité**, une autre caractéristique du système, qui traduit la coopération plus ou moins active de l'utilisateur avec l'EVI, ce qui requiert un ajustement réciproque de son comportement. Lin et Parker proposent également deux caractéristiques du système liées aux **repères visuels**, qui sont des indications visuelles aidant l'utilisateur à anticiper les mouvements de l'environnement. Ces repères prennent la forme d'indications de virages et d'un avatar guide indiquant les difficultés du parcours.

**Tableau 14. Facteurs d'influence caractéristiques du système d'après Lin et Parker, 2007 (notre traduction)**

Facteurs d'influence de l'UX	Indicateurs
Champ de vision	180° à l'horizontal
Vision stéréoscopique	Image projetée en relief
Mouvement visuel	Mouvement lent, moyen, rapide de l'environnement
Niveau d'interactivité	Coopération plus ou moins active de l'utilisateur et l'environnement
Repères visuels	Indications des virages, avatar guide indiquant les difficultés du parcours

L'utilisateur peut se sentir mal à l'aise s'il manque d'expérience dans l'interaction avec un EVI utilisé pour la première fois. Shin et al. (2013) suggèrent que l'**expérience précédente** d'apprentissage d'une technologie est une caractéristique de l'utilisateur (Tableau 15) qui influence grandement l'UX et qui mène *in fine* à l'adoption de cette technologie.

L'**expérience précédente sur des périphériques proches** contribuent au fait que l'utilisateur perçoive le système comme facile à utiliser et n'ait pas besoin d'explorer le système en détail, réduisant ainsi le temps d'exploration et d'apprentissage de la nouvelle technologie.

**Tableau 15. Facteur d'influence caractéristique de l'utilisateur d'après Shin et al., 2013 (notre traduction)**

Facteur d'influence de l'UX	Indicateurs
Expérience précédente	Apprentissage, exploration d'un autre système similaire

Pour Cheng et al. (2014), l'**interactivité** et la **vivacité** de l'EVI ainsi que l'**implication** de l'utilisateur sont respectivement les propriétés du système et une caractéristique de l'utilisateur qui impactent l'UX dans ce type d'environnement (Tableau 16). L'**interactivité** désigne le niveau et le type de contenu en temps réel de l'environnement virtuel auxquels doit s'ajuster l'utilisateur (e.g., temps d'attente, rapidité d'action, etc.). En revanche, la **vivacité** désigne principalement la quantité et la qualité des informations sensorielles perçues par ce dernier. L'**implication** est pour sa part associée à la familiarité de l'utilisateur avec l'environnement et le niveau d'importance qu'il accorde à son rôle dans l'environnement. L'**implication** est aussi un indicateur de la distinction entre expert et novice. Par ailleurs, Cheng et al. (2014) considèrent que l'**interactivité** et de la **vivacité** impactent significativement l'expérience vécue dans un EVI. Ces auteurs voient ces deux composants étroitement liés, la **vivacité** étant considérée comme un seuil qui, une fois atteint, stimule l'**interactivité**.

**Tableau 16. Facteurs d'influence caractéristiques du système et de l'utilisateur d'après Cheng et al., 2014 (notre traduction)**

Facteurs d'influence de l'UX	Indicateurs
Interactivité	Délai d'attente entre l'action de l'utilisateur et la réponse du système
Vivacité	Quantité, qualité d'informations sensorielles
Implication	Familiarité avec l'environnement, niveau d'importance du rôle dans l'environnement, distinction expert/novice

#### 4.2 Composants de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif

Lin et Parker (2007) proposent sept composants qui caractérisent l'UX pour les EVI (Tableau 17). Selon ces auteurs, durant une expérience virtuelle, l'utilisateur perçoit idéalement la **présence**, sous forme d'un sentiment d'être réellement « là » dans l'environnement virtuel. Il se sent **engagé**, c'est-à-dire qu'il est absorbé dans son environnement virtuel, et a la volonté d'optimiser ses efforts (i.e., « faire le mieux possible »). Il se sent **immersé**, et éprouve un ressenti qui résulte de la technologie de l'environnement virtuel remplaçant les stimuli sensoriels du réel par des stimuli sensoriels du virtuel. L'utilisateur est dans un état émotionnel positif, de **plaisir** et de **satisfaction**. Il ressent donc du **divertissement**, qui résulte de ses émotions et affects positifs durant l'expérience dans l'environnement virtuel. Et il ne ressent pas « le **mal de l'environnement virtuel** » qui correspond à un ressenti physiologique de mal-être dû au conflit sensoriel entre la vue et le système vestibulaire. Ce conflit est à

l'origine d'effets secondaires tels que la sudation, la fatigue, les nausées, les vertiges ou encore les maux de tête.

**Tableau 17. Sept composants de l'expérience utilisateur d'après Lin & Parker, 2007 (note traduction)**

Composants	Indicateurs
Présence	Sentiment d'être réellement là
Engagement	Absorption dans l'environnement virtuel, volonté d'optimiser ses efforts, vouloir « faire le mieux possible »
Immersion	Perception des stimuli sensoriels de l'environnement virtuel
Plaisir	Sentiment positif lié au bonheur
Satisfaction	Affect positif
Divertissement	Plaisir, satisfaction durant l'expérience
« Mal des environnements virtuels »	Effets secondaires tels que la sudation, la fatigue, les nausées, les vertiges, les maux de tête

Shin et al. (2013) proposent huit composants qui caractérisent l'UX dans un EVI d'apprentissage (Tableau 18). Comme Lin et Parker, ces auteurs proposent également la **présence**, l'**immersion** et la **satisfaction** comme faisant partie intégrante des composants de l'UX. Ils y ajoutent le **flow**, un état psychologique agréable de sentiment plaisant de contrôle et de joie que l'utilisateur ressent lorsqu'il est engagé dans son expérience. S'ensuit la **confirmation** qui naît lorsque la technologie répond aux attentes de l'utilisateur, et l'**intention d'utiliser** la technologie qui résulte des actions d'un utilisateur qui pense continuer l'utilisation ou adopter la technologie. Pour caractériser l'utilisabilité, deux composants viennent s'ajouter à la satisfaction : l'**utilité perçue** et la **facilité d'utilisation perçue**. Le premier est introduit par Shin et al. (2013) comme le sentiment que la technologie répond à une nécessité ou un besoin de l'utilisateur tandis que le second se réfère à la sensation éprouvée par l'utilisateur de réaliser sa tâche avec le moindre effort.

**Tableau 18. Huit composants de l'expérience utilisateur d'après Shin et al., 2013 (notre traduction)**

Composants	Indicateurs
Flow	Etat psychologique agréable, sentiment de contrôle, sentiment plaisant, de joie
Présence	Sentiment d'être réellement là
Immersion	Perception des stimuli sensoriels de l'environnement virtuel
Confirmation	Réponse aux attentes de l'utilisateur
Intention d'utiliser	Continuité dans l'utilisation, adoption de la technologie
Utilité perçue	Réponse à une nécessité, réponse au besoin de l'utilisateur
Facilité d'utilisation perçue	Réalisation d'une tâche avec le moindre effort
Satisfaction	Affect positif

Dans leur proposition de composants de l'UX pour les EVI, Cheng et al. (2014) identifient la **téléprésence** (i.e., la présence appliquée à une téléopération<sup>11</sup>) et le **flow** déjà proposés précédemment par Lin et Parker ainsi que Shin et al. (Tableau 19). En outre, ils complètent

<sup>11</sup> Dans un système de téléopération, l'utilisateur interagit via une interface homme-machine et un robot dans un environnement donné (le plus souvent réel) (Durlach, 1997).

ces composants en intégrant également les **compétences**, le **défi**, l'**attention**, les **affects positifs** et la **fidélisation**. Les **compétences** correspondent aux connaissances que l'utilisateur gagne dans la maîtrise de sa tâche. Le **défi** désigne principalement la difficulté perçue à l'utilisation de l'environnement. L'**attention**, quant à elle, est la considération visuelle que l'utilisateur apporte à sa tâche. Les **affects positifs** correspondent généralement à des états émotionnels positifs, de satisfaction. Enfin, la **fidélisation** se réfère à une attitude positive envers la technologie, ce qui signifie que l'utilisateur désire la réutiliser ultérieurement.

**Tableau 19. Sept composants de l'expérience utilisateur d'après Cheng et al., 2009 (notre traduction)**

<b>Composants</b>	<b>Indicateurs</b>
Flow	Etat psychologique agréable, sentiment de contrôle, sentiment plaisant, de joie
Compétence	Connaissance de l'utilisateur dans la maîtrise de la tâche
Défi	Difficulté perçue, à surmonter
Attention	Considération visuelle
Téléprésence	Sentiment d'être réellement là
Affect positive	Etat émotionnel, état d'esprit, humeur positifs, satisfaction
Fidélisation	Attitude positive envers la technologie, désir de l'utiliser

### 4.3 Modèles de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif

Un certain nombre de chercheurs (Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Lin & Parker, 2007) ont tenté de caractériser les IHEVI en termes d'UX. Nous avons identifié trois approches centrées *utilisateur* que nous allons examiner à travers une revue de trois modèles spécifiques aux EVI. Le premier modèle se focalise principalement sur les facteurs d'influence issus des propriétés de l'environnement virtuel qui favorisent une UX positive, tout en diminuant les conséquences néfastes qui peuvent surgir dans un EVI durant l'expérience. Le deuxième modèle s'inspire essentiellement des modèles de l'acceptabilité et présente les composants de l'acceptabilité de technologies immersives pour l'apprentissage. Enfin, le troisième modèle propose des composants et des facteurs d'influence autour de la notion de « flow », préalablement identifié comme un état d'entière implication dans sa tâche. Nous observons que ces modèles comportent des éléments de similitude (i.e., composants de l'UX similaires) mais avec une représentation différente (i.e., composants associés différemment).

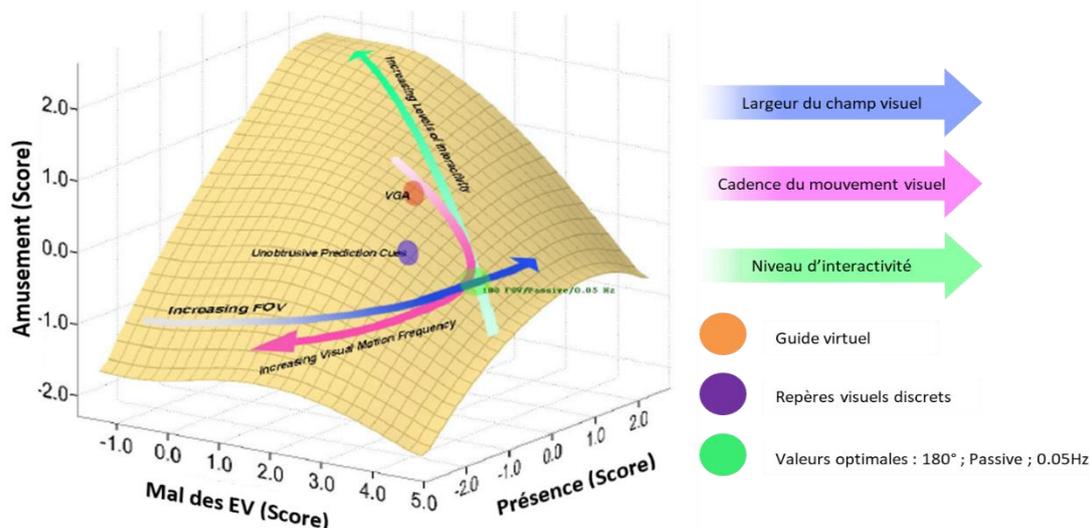
#### 4.3.1 Modèle de l'expérience utilisateur influencée par les caractéristiques de l'environnement virtuel

Un certain nombre d'approches qui consistent à élargir le champ de vision de l'EVI, induire une perception de mouvement chez l'utilisateur, se sont révélées efficaces pour augmenter son sentiment de présence et sa sensation d'immersion, composants clés caractéristiques des EVI. Cependant, ces approches qui favorisent un meilleur sentiment de présence, peuvent également augmenter la probabilité d'apparition du « mal des environnements virtuels » (ou

*cybersickness*) chez l'utilisateur. Ce phénomène affecte un grand nombre d'utilisateurs dans les EVI et interroge les chercheurs notamment sur ses causes (Cobb et al, 1999 ; Kennedy & Stanney, 1997). L'apparition du « mal du simulateur » dégrade fortement l'UX perçue chez un utilisateur et peut provoquer l'arrêt complet de l'utilisation de l'EVI. Le modèle de Lin et Parker (2007) conçu pour les EVI de divertissement à champ de vision large (Figure 8), vise à déterminer les caractéristiques de l'environnement virtuel (i.e., champ de vision, disparité stéréoscopique, mouvement visuel, niveau d'interactivité, repères visuels pour la prédiction du mouvement et avatar-guide virtuel<sup>12</sup>) conduisant à un niveau « optimal » d'UX et à un « mal des environnements virtuels » finalement peu perceptible. Parallèlement à ce constat, l'UX de cette étude se traduit par des évaluations subjectives positives du sentiment de présence et du degré de divertissement. Un déclin du sentiment de présence, engendré par une baisse d'engagement et d'immersion de l'utilisateur ou une hausse du ressenti de « mal des environnements virtuels » conduit généralement à une baisse du degré de divertissement, identifié par le plaisir et la satisfaction de ce dernier. De plus, la présence est associée au champ de vision (e.g., 180° à l'horizontal), à la vision stéréoscopique au mouvement visuel et au niveau d'interactivité. En revanche, le degré de divertissement est plutôt associé à la fréquence d'images, au niveau d'interactivité et aux repères visuels (e.g., le prochain virage est indiqué en avance à l'utilisateur). Enfin, le « mal des environnements virtuels » est surtout associé au champ de vision, à la vision stéréoscopique, à la fréquence d'images, au niveau d'interactivité et aux repères visuels. Les facteurs d'influence caractéristiques de l'EVI ont par ailleurs été manipulés (e.g., champ visuel à 60°, 100°, 140° ou 180° ; vision stéréoscopique *versus* vision monoscopique ; interactivité passive *versus* interactivité active, etc.) afin de relever les valeurs pour lesquelles l'UX serait optimale. Lin et Parker en concluent, pour les jeux de divertissement proposé dans un CAVE à 3 murs, que l'UX globale est améliorée lorsque l'EVI présente un mouvement visuel lent de la scène et un mode d'interaction actif avec la scène visuelle. De plus, des repères visuels de prédictions du mouvement dans l'EVI ajoutent au degré de divertissement de l'utilisateur et allègent le « mal des environnements virtuels » de celui-ci. Les auteurs révèlent également que si un champ de vision large (e.g., 180°) et une vision 3D stéréoscopique de l'EVI améliorent le sentiment de présence, ils provoquent néanmoins un « mal du simulateur » non négligeable chez l'utilisateur. Par conséquent, un champ de vision restreint (e.g., 60°) et une scène visuelle non stéréoscopique allègent ce « mal des environnements virtuels ». La Figure 8 montre un quadrillage jaune dont la surface représente toutes les valeurs possibles de la présence, du mal des EV et du divertissement en fonction de la variation (e.g., flèche bleue de la largeur du champ visuel) ainsi que de la présence ou non (e.g., point orange du guide virtuel) des facteurs d'influence. La variation, présence ou non de ces facteurs représentés par des flèches ou des points sont tracés sur la surface quadrillé et mettent en exergue un point précis des valeurs optimales pour la présence, le mal des EVI et le divertissement (i.e., point vert).

---

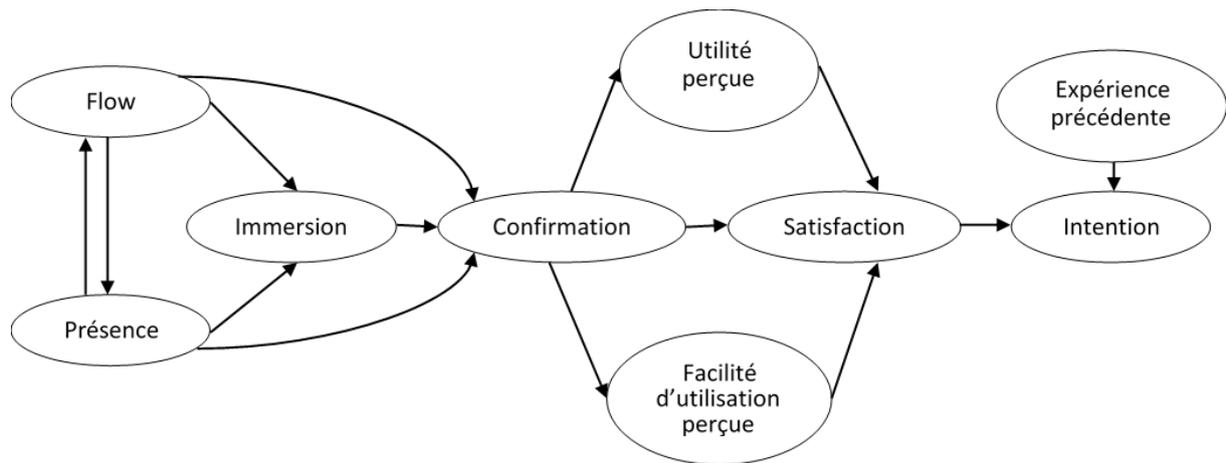
<sup>12</sup> Avatar à l'intérieur de l'EVI donnant des indications à l'utilisateur



**Figure 8. Modélisations des surfaces de réponses (MSR) de l'expérience utilisateur de Lin & Parker, 2007 (notre traduction)**

#### 4.3.2 Expérience utilisateur inspirée des modèles de l'acceptabilité

C'est dans le contexte de l'apprentissage que nous trouvons des modèles liant expérience utilisateur et acceptabilité. Dans ce contexte, les environnements virtuels ont prouvé leur efficacité (Kapp & O'Driscoll, 2009). En effet, sans limitation de temps, ni de distance, l'utilisateur a accès à différents outils d'apprentissage (e.g., programme, cours, assistant enseignant, espace de discussion, partage de documents, etc.). Ces derniers, combinés à une interactivité et une immersion en environnement 3D virtuel, permettent à l'utilisateur de communiquer avec des objets, des dessins ou des gestes, avec les autres avatars et facilite ainsi sa propre représentation, création et construction de son savoir. Cependant ces environnements virtuels d'apprentissage restent encore peu utilisés dans l'éducation. En effet, la question de l'acceptation de ces technologies se pose dans le secteur éducatif. Une bonne UX perçue au moment de l'utilisation des technologies 3D de l'EVI pourrait conduire à une meilleure acceptation de ces technologies par l'utilisateur. Le modèle de Shin et al. (2013), conçu pour les EVI d'apprentissage, se fonde ainsi sur les théories de l'acceptation des technologies (Figure 9). Ces auteurs y associent les composants de présence et d'immersion propres aux EVI. Le modèle, constitué de neuf dimensions (i.e., immersion, présence, flow, confirmation, utilité, facilité d'utilisation, satisfaction, intention, expérience précédente), suggère que l'intention d'utiliser la technologie est principalement déterminée par la satisfaction d'un usage antérieur et l'expérience précédente de son apprentissage avec une technologie semblable. La satisfaction est, quant à elle, principalement influencée par l'utilité, la facilité d'utilisation et la confirmation des attentes envers la technologie proposée. Cette confirmation des attentes en retour influence l'utilité et la facilité d'utilisation perçues. Les trois composants de flow, de présence et d'immersion ont un impact sur la confirmation des attentes de l'utilisateur envers la technologie. Enfin, le flow et la présence s'influencent entre eux et impactent l'immersion.



**Figure 9. Modèle d'expérience utilisateur de Shin et al., 2013 (notre traduction)**

### 4.3.3 Expérience utilisateur fondée sur le flow

Le flow défini à plusieurs reprises dans la section précédente a été introduit par Csikszentmihalyi (1975). L'accès à cet état optimal de flow suppose que l'utilisateur perçoive une bonne UX de l'environnement. Le modèle proposé par Cheng et al. (2014), conçu pour l'EVI de divertissement, qui repose effectivement sur le flow (Figure 10), identifie les conséquences de ce dernier mais aussi ses composants et ses facteurs d'influence. Ce modèle de dix dimensions (i.e., interactivité, compétence, implication, vivacité, attention, défi, présence, flow, fidélisation, affect positif), suggère que l'utilisateur entre en état de flow lorsque l'EVI comporte un bon niveau d'interactivité, qu'il crée un équilibre entre le défi représenté et les compétences de l'utilisateur, ou lorsque celui-ci y porte son attention et se sent présent. Ces derniers composants sont influencés par les paramètres de l'EVI tels que l'interactivité, stimulée par la vivacité de l'EVI (e.g., quantité d'informations sensorielles) et par son implication, une caractéristique propre à chaque utilisateur. De plus, l'attention de l'utilisateur et la vivacité de l'EVI influencent la téléprésence. Le flow crée par la suite des affects positifs et une fidélisation de l'utilisateur envers la technologie utilisée. Les auteurs ne sont, en revanche, pas parvenus à démontrer l'influence de l'interactivité sur la téléprésence, de l'implication et la vivacité sur l'attention et du défi sur le flow.

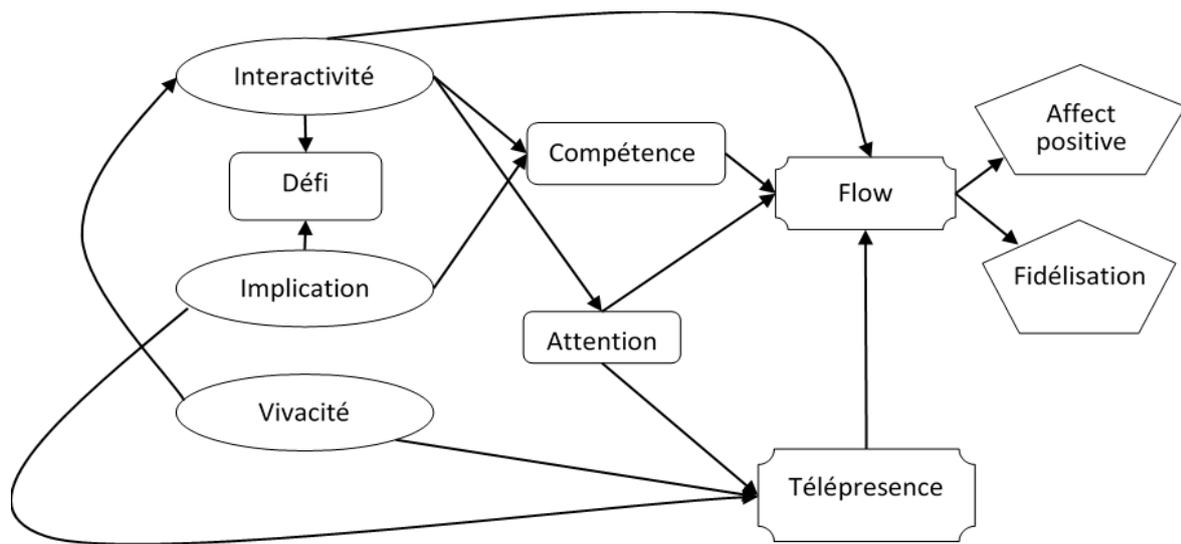


Figure 10. Modèle d'expérience utilisateur de Cheng et al., 2014 (notre traduction)

#### 4.4 Synthèse des composants de modèles de l'UX en EVI

Cette synthèse présente les composants issus des modèles :

- des surfaces de réponses de l'expérience utilisateur (Lin et Parker, 2007) ;
- d'expérience utilisateur (Shin, 2013) ;
- de l'expérience utilisateur (Cheng, 2014).

Les composants de ces modèles présentent certaines similarités. Dans le tableau de synthèse ci-dessous (Tableau 20) chaque composant (voir **Composants** dans le tableau) et les composants similaires à ce dernier (voir **Autres composants partageant des similitudes** dans le tableau) sont présentés. La colonne **Similarité** indique le lien de similitude entre les composants présentés sur la même ligne (e.g., A est un indicateur de B ou A et B partagent la même définition).

**Tableau 20. Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Autres composants partageant des similitudes	Similarité
Modèle des surfaces de réponses de l'expérience utilisateur (Lin et Parker, 2007)	Présence	Présence (Shin, 2013) ; téléprésence (Cheng, 2014)	La présence regroupe l'indicateur de téléprésence entre autres
	Engagement		
	Immersion	Immersion (Shin, 2013)	Définition commune
	Plaisir	Affect positif (Cheng, 2014)	La notion de plaisir est un indicateur d'affect positif
	Satisfaction	Satisfaction (Shin, 2013) ; affect positif (Cheng, 2014)	La notion de satisfaction est un indicateur d'affect positif
	Divertissement	Flow (Shin, 2013)	Le divertissement est un indicateur du flow
	« Mal des environnements virtuels »		
	<b>Facteurs</b>		
	Champ de vision		
	Vision stéréoscopique		
	Mouvement visuel		
	Niveau d'interactivité		
	Repères visuels		

**Tableau 20 (suite). Composants, composants d'autres modèles partageant des similitudes et similarité entre les composants des modèles de l'UX**

Modèles	Composants	Autres composants partageant des similitudes	Similarité
Modèle d'expérience utilisateur (Shin, 2013)	Flow	Flow (Cheng, 2014)	Définition commune
	Présence	Présence (Lin et Parker, 2007)	Définition commune
	Immersion	Immersion (Lin et Parker, 2007)	Définition commune
	Confirmation		
	Intention d'utiliser		
	Utilité perçue		
	Facilité d'utilisation perçue		
	Satisfaction	Satisfaction (Lin et Parker, 2007)	Définition commune
	<b>Facteur</b>		
	Expérience précédente		
Modèle de l'expérience utilisateur (Cheng, 2014)	<b>Composants</b>		
	Flow	Flow (Shin, 2013)	Définition commune
	Compétence		
	Défi		
	Attention		
	Téléprésence	Présence (Lin et Parker, 2007) ; présence (Shin, 2013)	La téléprésence est un indicateur de la présence
	Affect positive	Plaisir (Lin et Parker, 2007) ; satisfaction (Lin et Parker, 2007) ; satisfaction (Shin, 2013)	La notion d'affect positif regroupe les indicateurs de plaisir et de satisfaction
	Fidélisation		
	<b>Facteurs</b>		
	Interactivité		
	Vivacité		
	Implication		

## 5. Expérience utilisateur en interaction homme-environnement virtuel immersif : outils d'évaluation

La mesure d'un composant s'appuie principalement sur une métrique (i.e., mesure objective) ou sur l'avis de l'utilisateur (i.e., mesure subjective) (Tableau 21). A titre d'exemple (Loup-Escande & Lécuyer, 2014), l'utilisabilité peut se mesurer comme l'atteinte du résultat prévu (i.e., efficacité), le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs (i.e., efficience). Elle peut aussi se mesurer à travers des mesures subjectives des ressentis et opinions de l'utilisateur (i.e., satisfaction).

**Tableau 21. Exemple d'une métrique subjective et objective du composant « utilisabilité ».**

Composant	Mesure subjective	Mesure objective
Utilisabilité	Questionnaire de satisfaction	Nombre de cibles atteintes
		Niveaux atteints
		Temps total d'accomplissement de la tâche
		Nombre d'erreurs

Le plus souvent, les mesures subjectives sont réalisées à partir de réponses à des questionnaires portant sur la satisfaction de l'utilisateur. Ce dernier pourra par exemple évaluer sa satisfaction en se plaçant sur une échelle de Likert à dix points (Figure 11).

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	
<b>Pas du tout d'accord</b>	<input type="checkbox"/>	<b>Tout à fait d'accord</b>									

**Figure 11. Exemple d'une échelle de Likert à 10 points**

La seconde catégorie de mesure se réfère aux méthodes de mesures objectives (i.e., pas d'intervention d'éléments affectifs ou de facteurs personnels dans la prise de mesures). Le recueil de ces mesures peut se réaliser à travers des indicateurs physiologiques (Mahlke & Minge, 2006) tels que l'activité des muscles faciaux mesurée par un capteur ElectroMyoGramme (EMG).

Dans cette partie, nous examinons plus en détails ce que propose la littérature scientifique dédiée à la mesure des composants de l'UX. Puis nous proposons un tableau récapitulatif des composants et facteurs influents évoqués ainsi que les études sources dont ils s'inspirent.

### 5.1 Évaluation de l'expérience utilisateur relative à l'utilisation de technologies traditionnelles

Nous proposons ci-après de nous intéresser aux études empiriques sur la mesure de l'UX issues des travaux présentés précédemment dans le cadre de l'identification des modèles, composants et facteurs. Les auteurs de ces travaux ont en commun la proposition d'un outil de mesure de l'UX validé opérationnalisant leur modèle. Ces études concernent le cadre d'utilisation de leur outil. Ces derniers sont décrits par auteur dans les sections suivantes.

### 5.1.1 Étude de Hassenzahl sur l'expérience utilisateur de sept logiciels et trois types d'écrans d'ordinateur

Dans leur première étude, Hassenzahl et al. (2000) proposent de mesurer l'UX de sept prototypes logiciels qui s'exécutent sur ordinateur et simulent un processus de désactivation d'une pompe industrielle dans une usine. Pour ces prototypes qui varient selon plusieurs critères de conception (e.g., couleurs, style, animation), les auteurs mesurent leur UX avant et après leur utilisation et obtiennent respectivement les « valeurs attendues » et les « valeurs expérimentées ».

Hassenzahl propose alors une seconde étude pour appuyer la fiabilité et la validité de son modèle théorique avec des vrais logiciels existants. Il compare ainsi trois types d'écrans d'ordinateur lors de tâches classiques (e.g., jeu de mah-jong<sup>13</sup>, recherche sur internet, édition de texte) : un écran CRT standard (i.e., écran à tube à rayon cathodique), un écran LCD (i.e., écran à cristaux liquides) et un écran virtuel projeté.

Dans ces deux études, les auteurs mesurent l'UX à travers 3 composants de l'UX : la qualité hédonique, la qualité pragmatique et un jugement d'attractivité. Ils développent un questionnaire sémantique différentiel qu'ils utilisent dans leurs deux études composées de huit items pour mesurer la qualité pragmatique (e.g., « *compréhensible/incompréhensible* »), sept items pour mesurer la qualité hédonique (e.g., « *intéressant/ennuyeux* ») et huit items pour mesurer le jugement d'attractivité (e.g., « *plaisant/déplaisant* »). Les items de l'AttrakDiff 2 ont été générés lors d'un atelier réunissant six experts ergonomes impliqués dans une séance de brainstorming, d'évaluation et de sélection (Hassenzahl et al., 2003). Ce questionnaire est très souvent utilisé et il a fait l'objet de plusieurs traductions validées par des experts du domaine (e.g., Lallemand et al., 2015).

### 5.1.2 Étude de Mahlke sur l'expérience utilisateur de trois types de lecteurs audio portables

Dans son étude empirique portant sur l'évaluation d'UX de lecteurs audio portables, Mahlke (2008) sélectionne des systèmes, des utilisateurs et des contextes aux caractéristiques différentes. Dans la première partie expérimentale, la présentation (i.e., design du menu), le dialogue (i.e., style des entrées et des interactions) et l'apparence (i.e., design et taille) des systèmes varient. Dans la deuxième partie expérimentale, c'est la présentation (i.e., lignes discernables simultanément dans le menu, présence ou non d'une barre de défilement pour accéder aux lignes cachées, présence ou non d'une indication sur la position dans la hiérarchie) et l'apparence (i.e., symétrie, combinaison des couleurs, forme) des systèmes qui varient. Dans la troisième partie de son étude, le milieu culturel et le mode d'utilisation varient également, en plus des deux caractéristiques déjà citées pour l'étude 2.

Dans les trois parties de son étude, Mahlke mesure les qualités instrumentales, les qualités non-instrumentales, les réactions émotionnelles et les conséquences de l'expérience. Il mesure l'interaction en plus dans la première partie de son étude. Pour cela, il choisit deux métriques de performance de l'utilisateur : le nombre de tâches accomplies et le temps moyen d'exécution des tâches.

---

<sup>13</sup> Jeu de société d'origine chinoise composé de 144 tuiles, proposé également sous forme numérique sur ordinateur

Pour mesurer les qualités instrumentales, dans la première partie de son étude, son approche expérimentale repose sur cinq items d'utilité et cinq items de facilité d'utilisation tous deux inspirés de Davis (1989). Dans la deuxième et troisième partie de son étude, il mesure l'utilisabilité perçue, en sélectionnant quatre items : un item de facilité de contrôle, un item d'efficacité, un item de facilité d'aide et un item de facilité d'apprentissage provenant de l'outil Software Usability Measurement Inventory<sup>14</sup> (SUMI ; Kirakowski, 1996).

Pour mesurer les qualités non-instrumentales, Mahlke se base tout d'abord sur cinq items de l'esthétique visuelle recommandés par Lavie et Tractinsky (2004), cinq items de la qualité haptique inspirés de Jordan (2000) et sept items de la qualité symbolique inspirés de Hassenzahl (2004) pour la première partie de son étude. La seconde et troisième partie de son approche reposent uniquement sur les cinq items de l'esthétique visuelle recommandés par Lavie et Tractinsky (2004).

En ce qui concerne les réactions émotionnelles de l'utilisateur, l'approche de Mahlke, pour la première partie de son étude repose sur un item de valence affective et un item d'excitation qui sont des ressentis subjectifs inspirés de l'outil d'auto-évaluation « *self-assessment manikin*<sup>15</sup> » (SAM) de Lang (1980). Pour la deuxième partie de l'étude, il utilise 3 méthodes dont la première correspond à l'outil d'auto-évaluation SAM de Lang (1980) pour capturer la qualité et l'intensité des émotions subjectives. La seconde concerne l'activité électrodermale et la fréquence cardiaque pour capturer les réactions physiologiques (Ward & Marsden , 2003) et la troisième désigne les réponses électromyographiques des muscles qui contrôlent le sourire et le froncement des sourcils (i.e., les principaux muscles zygomatiques et le muscle corrugateur du sourcil) pour capturer les expressions faciales (Partala & Surakka, 2004). Pour la dernière partie de son étude, il couple l'outil SAM avec cette fois-ci un questionnaire inspiré du Geneva Appraisal Questionnaire<sup>16</sup> (GAQ) de Scherer (2001) qui mesure cinq dimensions de l'évaluation cognitive (i.e., plaisir intrinsèque<sup>17</sup>, nouveauté<sup>18</sup>, aboutissement des objectifs<sup>19</sup>, possibilité d'adaptation<sup>20</sup> et adéquation aux standards internes/externes<sup>21</sup>).

Pour mesurer les conséquences de l'expérience, il se base sur trois items du jugement global inspirés du modèle d'acceptation de Kolleermann (2004). Un classement des différents lecteurs audio portables caractérise également les conséquences de l'UX et permet d'identifier les meilleurs choix des utilisateurs, dans la première partie de son étude. Deux méthodes mesurent les conséquences de l'expérience, dans la deuxième partie : cinq items de l'outil SUMI pour le jugement global et une identification du meilleur choix entre deux versions de lecteurs portables. Enfin seul l'outil SUMI est utilisé pour le jugement global dans sa troisième partie.

---

<sup>14</sup> Inventaire pour la mesure de l'utilisabilité logicielle

<sup>15</sup> Mannequin d'auto-évaluation

<sup>16</sup> Questionnaire Genevois d'Evaluation Cognitive

<sup>17</sup> Relatif au stimulus résultant en une émotion positive ou négative

<sup>18</sup> Mesure de familiarité ou de prédictibilité de l'occurrence du stimulus

<sup>19</sup> Relatif à l'importance des stimuli pour les objectifs ou les besoins immédiats

<sup>20</sup> Relatif au degré selon lequel un événement peut être contrôlé ou influencé

<sup>21</sup> Relatif au degré selon lequel un stimulus satisfait aux standards internes ou externes

### 5.1.3 Étude de Wu et al. sur la qualité de l'expérience d'un espace interactif et collaboratif

Dans leur étude, Wu et al. (2009) s'intéressent aux technologies interactives et collaboratives ou Distributed Interactive Multimedia Environments<sup>22</sup> (DIMEs) qui permettent d'afficher un environnement télé-immersif en 3 Dimensions (3D). Le système utilisé s'appuie sur une représentation en temps réel, multi-vue en vidéo 3D de plusieurs objets (e.g., personnes, arrière-plan, balle, etc.) dans un environnement virtuel. Par exemple, bien qu'ils soient distants les uns des autres, les utilisateurs de ce type de système sont représentés en 3D, immergés dans un espace virtuel qui leur permet également d'interagir avec leur corps entier (e.g., apprentissage de la danse, Tai-Chi, etc.). Pour permettre l'interaction, différents types d'objets peuvent y être représentés de manière virtuelle (e.g., deux personnes à distance peuvent se lancer une balle virtuelle tour à tour dans un DIME). Wu et al. installent deux environnements séparés, connectés uniquement par le son et une vision similaire d'un espace virtuel joignant les deux environnements sur un écran. Deux caméras dans chaque environnement sont à la base de la représentation 3D de chaque joueur dans les environnements sur l'écran. Les joueurs effectuaient trois types de tâches. La première est le saut à la corde : l'un des joueurs tourne une corde virtuelle pendant que l'autre tente de sauter par-dessus sans la toucher en la visualisant à l'écran. La deuxième est un jeu de mime : l'un des joueurs mime une action et l'autre joueur tente de la deviner. La troisième est un jeu de dessin : l'un des joueurs décrit un dessin à travers plusieurs types de communication (i.e., audio, visuel, audio-visuel) et l'autre tente de le dessiner.

Les auteurs ont récolté des données objectives et subjectives pour valider leur modèle. Les performances des utilisateurs, soit le ratio du nombre de tâches réussies et du temps de réalisation de la tâche, constituèrent les données objectives. Les données subjectives étaient mesurées à l'aide d'un questionnaire d'UX développé par les auteurs. Ils s'inspirent des théories de Ghani & Deshpande (1994), Hoffman & Novak (1996) et Koufaris (2002) pour développer leurs questions descriptives relatives respectivement aux composants de concentration, de divertissement intrinsèque et de sentiment de contrôle. Ils s'inspirent de Davis (1989) pour développer leurs questions descriptives qui concernent les composants d'utilité et de facilité d'utilisation. Ils s'inspirent enfin de Steuer (1992) pour développer leurs questions descriptives propres au composant de téléprésence. Les utilisateurs répondaient aux questions sur une échelle de Likert à 7 points codée de « 1 : pas du tout d'accord » à « 7 : Tout à fait d'accord ».

### 5.1.4 Étude de Takatalo et al. sur l'expérience utilisateur de deux jeux vidéo

Dans leur étude, Takatalo et al. (2010) s'intéressent à deux jeux vidéo fonctionnant sur ordinateur. Le premier, « Half Life 2 » (2004), est un jeu un-joueur First Person Shooter<sup>23</sup> (FPS) de science-fiction. Il propose à l'utilisateur d'évoluer sur une planète Terre pillée de ses ressources et infestée d'extraterrestres, en la personne du scientifique Gordon Freeman. Le second, « Counter Strike » (2004), est un jeu multi-joueurs FPS de tir. Il propose à

---

<sup>22</sup> Environnement MultiMedia Interactif Distribué

<sup>23</sup> Tir à la première personne

l'utilisateur d'évoluer dans un univers de combat où il fait partie d'une unité de combattants entraînés pour contrer les attaques terroristes. Ces deux jeux ont été développés et publiés par l'éditeur de jeu américain Valve Corporation et fonctionnent sur la même technologie de moteur de jeu Source®.

Les auteurs mesurent l'aspect multidimensionnel de l'UX de ces jeux numériques à travers le questionnaire Experimental Virtual Environment Experience Questionnaire-Game Pitkä

<sup>24</sup> (EVEQ-GP) qu'ils développent. Ils ont extrait 139 items représentatifs des 180 items originels du EVEQ-GP. 69 items, inspirés de plusieurs études (i.e., Lessiter et al., 2001 ; Schubert et al., 2001 ; Lombard et al., 2000 ; Usoh et al., 2000 ; Witmer & Singer, 1998 ; Kim & Biocca, 1997 ; Fontaine, 1992 ; Havlena & Holbrook, 1986) mesurent le composant de présence et sont subdivisés en six sous-composants, dont 17 items dédiés à l'échelle de présence physique (e.g., « *Dans l'environnement du jeu tout semblait réel et vivant* ») ; 12 items à l'échelle d'attention (e.g., « *Ma vision était totalement engagée dans l'environnement du jeu* ») ; 14 items dédiés à celle de la co-présence (e.g., « *Je sentais que j'étais dans l'environnement du jeu avec d'autres personnes* ») ; 12 autres items sont dédiés à celle de l'engagement dans le rôle (e.g., « *Je sentais que j'étais un des personnages de l'histoire dans le jeu* ») ; 5 items mesurent la charge émotionnelle (e.g., « *active, stimulée/passive, endormie* ») ; 9 items mesurent l'interaction (e.g., « *Le jeu répondait rapidement à mes actions* »). 14 items inspirés de McQuarrie & Munson (1992) mesurent le composant d'implication qui est subdivisé en deux sous-composants, dont 6 items pour l'échelle d'intérêt (e.g., « *Le jeu était passionnant* ») et 8 pour celle de l'importance (e.g., « *Le jeu m'importait* »). 56 items inspirés de plusieurs études (i.e., Novak et al., 2000 ; Ghani & Deshpande, 1994 ; Webster & Martocchio, 1992) mesurent le composant de flow et sont subdivisés en sept sous-composants, dont 5 items qui mesurent l'échelle de défi (e.g., « *Jouer à ce jeu représentait un défi* »), 11 items sont dédiés à l'échelle de compétence (e.g., « *Je sentais que je pouvais répondre aux exigences de la situation du jeu* »), 10 items sont dédiés à l'échelle de valence hédonique (e.g., « *Je me sentais joyeux(se) Je me sentais triste* »), 7 items à celle du divertissement (e.g., « *Je le recommanderai à mes amis* »), 9 items à celle de l'esprit récréatif (e.g., « *Je me sentais innovant(e)* »), 5 items mesurent l'échelle de contrôle (e.g., « *J'étais dominant/J'étais soumis* »), et 9 items celle de l'effet impressionnant (e.g., « *J'étais étonné(e) et surpris(e) de cet environnement du jeu* »).

### 5.1.5 Tableau récapitulatif des études empiriques sur l'expérience utilisateur

Une synthèse des composants et des facteurs d'influence détaillés dans les sections précédentes est présentée dans les tableaux ci-dessous (Tableau 22). Ils synthétisent les composants, les indicateurs, les études sources dont ils proviennent, les systèmes interactifs traditionnels utilisés et la nature subjective ou objective des composants.

---

<sup>24</sup> Questionnaire long d'expérience pour les jeux vidéo en environnement virtuel expérimental

**Tableau 22. Composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif traditionnel utilisé, nature des composants et méthode d'évaluation**

Composants	Indicateurs	Sources	Système interactif	Nature	Méthode	
<b>Hassenzahl, 2001</b>						
Qualité hédonique		Expert ergonomes	Prototype logiciel	Ecrans CRT, LCD et virtuel	Subjective	Echelle sémantique différentielle
Qualité pragmatique		Expert ergonomes				
Jugement d'attractivité		Expert ergonomes				
<b>Mahlke, 2008</b>						
Interaction	Nombre de tâches accomplies Temps d'exécution moyen	Mahlke, 2008	Trois types de lecteurs audio portable	Objective	Traces	
Qualité instrumentale	Utilité	Davis, 1989		Subjective	Echelle de mesure	
	Facilité d'utilisation	Davis, 1989				
Qualité non-instrumentale	Utilisabilité perçue : facilité de contrôle, efficacité, facilité d'aide, facilité d'apprentissage	Kirakowski, 1996		Subjective	Echelle de mesure	
	Esthétique visuelle	Lavie et Tractinsky, 2004				
	Qualité haptique	Jordan, 2000				
	Qualité symbolique	Hassenzahl, 2004				
Réaction émotionnelle	Valence affective	Lang, 1980		Subjective	Pictogramme	
	Excitation					
	Réaction physiologique	Ward & Marsden, 2003		Objective	Activité électrodermale / fréquence cardiaque Réponses électromyographiques des muscles	
	Expression faciale	Partala & Surakka, 2004				
Conséquences de l'UX	Evaluation cognitive : plaisir intrinsèque, nouveauté, aboutissement des objectifs, possibilité d'adaptation et adéquation aux standards internes/adéquation aux standards externes	Scherer, 2001	Subjective	Echelle de mesure / pictogramme		
	Jugement Choix parmi les alternatives	Kolleman, 2004 Mahlke, 2008	Subjective	Echelle de mesure Classement		

**Tableau 22 (suite) composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif traditionnel utilisé et nature des composants**

Composants	Indicateurs	Sources	Système interactif	Nature	Méthode
<b>Wu et al., 2009</b>					
Performance	Nombre de tâches réussies Temps de réalisation de la tâche	Wu et al., 2009	Environnement 3D télé immersif	Objective	Traces
Concentration		Ghani & Deshpande, 1994		Subjective	Echelle de mesure
Divertissement intrinsèque		Hoffman & Novak, 1996		Subjective	
Sentiment de contrôle		Koufaris, 2002		Subjective	
Utilité		Davis, 1989		Subjective	
Facilité d'utilisation		Davis, 1989		Subjective	
Téléprésence		Steuer, 1992		Subjective	
<b>Takatalo et al., 2010</b>					
Présence	Présence physique	Lessiter et al., 2001 ; Schubert et al., 2001 ; Lombard et al., 2000 ; Usoh et al., 2000 ; Witmer & Singer, 1998 ; Kim & Biocca, 1997 ; Fontaine, 1992 ; Havlena & Holbrook, 1986	Jeux vidéo Half-Life 2 et Counter-Strike	Subjective	Echelle de mesure
	Attention				
	Co-Présence				
	Engagement dans le rôle				
	Charge émotionnelle				
Interaction					
Implication	Intérêt	McQuarrie & Munson, 1992		Subjective	
	Importance				
Flow	Défi	Novak et al., 2000 ; Ghani & Deshpande, 1994 ; Webster & Martocchio, 1992		Subjective	
	Compétence				
	Valence hédonique				
	Divertissement				
	Esprit récréatif				
	Contrôle				
Effet impressionnant					

## 5.2 Évaluation de l'expérience utilisateur en Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif

### 5.2.1 Étude de Lin et Parker sur l'expérience utilisateur d'un cave à trois murs de projection

Le dispositif immersif utilisé dans l'étude pour la validation du modèle de Lin et Parker (2007) est un simulateur de conduite réel qui inclut une voiture à l'échelle réelle, un CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) ou salle immersive à trois murs de projection et des lunettes 3D stéréoscopiques dont se munit l'utilisateur. Cet EVI reconstitue le déplacement en voiture dans un univers ludique virtuel et permet aux utilisateurs de se sentir réellement immergés dans un monde virtuel tout en étant installés dans une voiture réelle.

Les auteurs ont développé un outil de mesure (i.e., E<sup>2</sup>I Scale) qu'ils associent à leur modèle pour mesurer l'UX. Le principe des items de présence repose sur les attributs d'engagement et d'immersion. Ainsi, les 9 items de la présence (e.g., « *Jusqu'à quel point étiez-vous capable d'inspecter ou d'examiner activement l'environnement visuellement ?* ») ont été construits à partir des questionnaires de Singer et Witmer (1996) et de Slater et al. (1994). Lin et Parker ont basé les items du divertissement sur les attributs de plaisir et satisfaction. Ainsi, ils ont proposé 5 items du divertissement (e.g., « *A quel point vous sentiez-vous triste lorsque l'expérience s'est achevée ?* »). Enfin, le « mal des environnements virtuels » a été mesuré avec les items des questionnaires SSQ (e.g., « *Difficulté à se concentrer. Aucun / mineur / modéré / sévère.* ») de Kennedy et al. (1993) et RSSQ de Kim et al. (2004) (e.g., « *Engourdissement. Aucun = 0 / Sévère = 10* »).

### 5.2.2 Étude de Shin et al. sur l'expérience virtuelle d'une salle de classe virtuelle

Le dispositif immersif utilisé dans l'étude de la validation du modèle du Shin et al. (2013) est un écran 3D stéréoscopique qui reconstitue une salle de classe virtuelle. Le professeur, précédemment filmé dans son environnement grâce à une caméra 3D stéréoscopique, apparaît alors dans le cours qui est ensuite diffusé aux étudiants à travers un écran 3D stéréoscopique. Cet environnement leur permet de se sentir réellement en interaction avec leur enseignant dans une salle de classe.

Shin et al. associent leur modèle à un questionnaire qu'ils créent pour mesurer chacun des composants. Ainsi, ils mesurent l'intention d'utiliser le dispositif en sélectionnant 3 items (e.g., « *Je pense que j'utiliserai les environnements virtuels d'apprentissage dans le futur* ») inspirés de Davis (1989) et de Roca et al. (2006). Les 3 items de la facilité d'utilisation (e.g., « *Je trouve qu'apprendre via les environnements virtuels d'apprentissage est facile* ») sont inspirés de Davis (1989) et les 3 items de l'utilité perçue (e.g., « *Je pense que les environnements virtuels d'apprentissage me sont utiles* ») sont quant à eux inspirés de Davis (1989) et Yoon et al. (2008). Ils mesurent l'immersion avec 3 items (e.g., « *Pendant le cours, je me suis senti(e) comme dans une salle de classe avec un professeur* ») inspirés de Jennett et al. (2008). Les 3 items du flow et de la présence (e.g., « *Il y a une impression de contact humain dans les environnements virtuels d'apprentissage* ») sont inspirés de Shin et Kim

(2008) dont l'approche repose sur les travaux de recherche de Hassanein et Head (2007) pour la présence. Les 3 items de la satisfaction (e.g., « *Dans l'ensemble, je suis satisfait(e) de l'expérience avec les environnements virtuels d'apprentissage* ») sont adaptés de Roca et al. (2006), et enfin Shin et al. s'inspirent de Lin et al. (2005) pour les 3 items de la confirmation (e.g., « *Mon expérience d'utilisation des environnements virtuels d'apprentissage était meilleure que ce à quoi je m'attendais* »). L'expérience précédente, qui désigne – rappelons-le – le niveau d'expérience (en mois ou année) avec les technologies d'apprentissage en ligne (e.g., 1-3 mois, 3 ans, etc. ) constitue un facteur d'influence caractéristique de l'utilisateur.

### 5.2.3 Étude de Cheng et al. sur l'expérience utilisateur d'un simulateur de conduite virtuelle

Le type de dispositif immersif utilisé dans l'étude de validation du modèle de Cheng et al. (2014) est un simulateur à 6 axes avec retours de force (i.e., rotation, vibration, etc.) des différentes commandes dans l'environnement virtuel, sur le siège et dans la cabine sur 6 axes. Ce type de dispositif est souvent utilisé pour des applications de divertissement de type pilotage d'engin aérien (e.g., Maxflight USA) ou de conduite de véhicules terrestres (e.g., Injoy Motion Corp Taiwan). L'application virtuelle utilisée ici est un jeu de conduite et de défense de chars dans un contexte de guerre (i.e., 2<sup>nd</sup> guerre mondiale).

Cheng et al. associent ce modèle au développement d'un questionnaire qui mesure les composants d'UX et la façon dont les facteurs d'influence sont perçus par l'utilisateur. Ainsi, ils s'inspirent des travaux de Novak et al. (2000) pour sélectionner les 12 items de compétence (e.g., « *Je suis très doué(e) pour jouer à ce jeu* »), de défi (e.g., « *Jouer à ce jeu est un bon moyen de tester mes compétences* »), d'affect positif (e.g., « *Malheureux(se) / heureux(se)* ») et de flow (e.g., « *Pensez-vous avoir à un moment expérimenté le flow dans ce jeu ?* »). Pour les 4 items de l'attention (e.g., « *Pas intensément absorbé(e) dans l'activité / intensément absorbé dans l'activité(e)* »), les auteurs s'inspirent des travaux de Ghani et Deshpande (1994) et pour les 6 items de la téléprésence (e.g., « *Je n'ai plus pensé à mon environnement immédiat pendant que je jouais au jeu* ») ils s'inspirent des items de Novak et al. (2000) qui s'inspirent des travaux de Kim et Biocca (1997). Cheng et al. s'inspirent des travaux de Franzen (1999) et Zeithaml et al. (1996) pour sélectionner les 3 items de la fidélisation (e.g., « *Je recommanderai le jeu auquel j'ai joué aux autres* ») et leur approche repose sur les travaux de Novak et al. (2000) inspirés de Steuer (1992) pour sélectionner les 3 items de l'interactivité perçue (e.g., « *Lorsque je joue au jeu, il y a peu d'intervalle entre mes actions et la réponse du système* »). Les auteurs s'inspirent principalement des travaux de Witmer et Singer (1998) pour sélectionner les 3 items de la vivacité perçue (e.g., « *A quel point les informations sensorielles reçues étaient incohérentes ou sans rapport ?* »). Enfin, les travaux de Laurent et Kapferer (1985) leur ont permis de sélectionner les 3 items du niveau d'implication (e.g., « *J'ai un grand intérêt pour ce jeu* »).

#### 5.2.4 Tableau récapitulatif des études empiriques de l'expérience utilisateur relative aux Environnements Virtuels Immersifs

Une synthèse des composants et des facteurs d'influence détaillés dans les sections précédentes est présentée dans les tableaux ci-dessous (Tableau 23). Ils synthétisent les composants, les indicateurs, les études sources dont ils proviennent, les systèmes interactifs immersifs utilisés, la nature subjective ou objective des composants et les méthodes d'évaluation mobilisées.

**Tableau 23. Composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif immersif utilisé, nature des composants et méthode d'évaluation**

	<b>Indicateurs</b>	<b>Sources</b>	<b>Système interactif immersif</b>	<b>Nature</b>	<b>Méthode</b>
<b>Lin &amp; Parker, 2007</b>					
<b>Composants</b>					
Présence	Présence	Singer et Witmer (1996) ; Slater et al. (1994)	CAVE à trois murs de projection	Subjective	Echelle de mesure
	Engagement	Singer et Witmer (1996) ; Slater et al. (1994)			
	Immersion	Singer et Witmer (1996) ; Slater et al. (1994)			
Divertissement	Plaisir	Lin et Parker (2007)			
	Satisfaction	Lin et Parker (2007)			
Mal des environnements virtuels		Kennedy et al. (1993) ; Kim et al. (2004)			
<b>Facteurs d'influence</b>					
Champ de vision		Lin et Parker (2007)	CAVE à trois murs de projection	Objective	
Vision stéréoscopique		Lin et Parker (2007)			
Mouvement visuel		Lin et Parker (2007)			
Niveau d'interactivité		Lin et Parker (2007)			
Repères visuels		Lin et Parker (2007)			
<b>Shin et al., 2013</b>					
<b>Composants</b>					
Flow		Shin et Kim (2008)	Ecran 3D stéréoscopique	Subjective	Echelle de mesure
Présence		Shin et Kim (2008) ; Hassanein et Head (2007)			
Immersion		Jennett et al. (2008)			
Confirmation		Lin et al. (2005)			
Utilité perçue		Yoon et al. (2008) ; Davis (1989)			
Facilité d'utilisation perçue		Davis (1989)			
Satisfaction		Roca et al. (2006)			
Intention d'utiliser		Davis (1989) ; Roca et al. (2006)			
<b>Facteurs d'influence</b>					
Expérience précédente		Shin et al. (2013) ; Reed et Giessler (1996)	Ecran 3D stéréoscopique	Subjective	Echelle de mesure

**Tableau 23 (suite). Composants, indicateurs, études sources identifiées, système interactif immersif utilisé et nature des composants**

<b>Indicateurs</b>	<b>Sources</b>	<b>Système interactif</b>	<b>Nature</b>	<b>Méthode</b>
<b>Cheng et al., 2014</b>				
<b>Composants</b>				
Flow	Novak et al. (2000)	Simulateur 6 axes de conduite	Subjective	Echelle de mesure
Compétence	Novak et al. (2000)			
Défi	Novak et al. (2000)			
Attention	Ghani et Deshpande (1994)			
Téléprésence	Novak et al. (2000) ; Kim et Biocca (1997)			
Affect positive	Novak et al. (2000)			
Fidélisation	Franzen (1999) ; Zeithaml et al. (1996)			
<b>Facteurs d'influence</b>				
Interactivité	Novak et al. (2000) ; Steuer (1992)	Simulateur 6 axes de conduite	Subjective	Echelle de mesure
Vivacité	Witmer et Singer (1998)			
Implication	Laurent et Kapferer (1985)			

## 6. Conclusion de l'état de l'art

Notre état de l'art montre que l'UX est un concept largement étudié et ce dans plusieurs domaines liés aux interfaces homme-machine. Nous avons identifié les modèles génériques de l'UX pour toutes les IHM, puis nous avons pu également identifier les modèles d'UX spécifiques aux EVI. Selon les auteurs, il existe des composants et des facteurs se recoupant, parfois avec des dénominations différentes. Avec notre état de l'art nous apportons une vision globale et unifiée de ces différents composants de l'UX. Nous avons également constaté que plusieurs études empiriques proposent de mesurer les composants de l'UX au travers de questionnaires, l'une des méthodes d'évaluation les plus répandues, notamment pour sa simplicité d'utilisation et d'exécution. Nous faisons donc le constat général que l'UX est un concept essentiel à intégrer dans les processus de conception pour améliorer l'interaction de l'humain avec la technologie.

Notre état de l'art souligne toutefois deux points en ce qui concerne l'UX des EVI :

Premièrement, comparée à d'autres domaines comme par exemple l'UX des systèmes interactifs traditionnels (e.g., applications mobiles, sites internet) qui regorgent de processus de conception adaptés (e.g., conception centrée utilisateur, conception participative, cycle en V, co-création, scrum), de méthodes d'évaluation (e.g., critères ergonomiques, heuristiques, think aloud, card sorting,...) et de composants caractérisant l'UX (e.g., qualité ergonomique, qualité pragmatique, accessibilité, ...), nous faisons le constat que l'UX des EVI n'est souvent identifiée que par quelques composants clés comme par exemple la présence ou l'immersion. Ces concepts, bien qu'étant primordiaux ne sont pourtant pas suffisants pour définir l'UX des EVI qui peut-être, plus encore que d'autres technologies plus « classiques », se doit de proposer une UX fiable principalement pour éviter notamment de faire face à la problématique du mal des environnements virtuels immersifs et à celle de l'adoption de technologies émergentes. La problématique du mal des environnements virtuels immersifs a été identifiés depuis les années 1990 dans des expériences impliquant des EVI (Kennedy et al., 1992). À ce jour, les technologies des EVI (e.g., casque de RV, salle immersive à murs de projection) ne peuvent garantir une expérience sans mal des environnements virtuels. Les symptômes allant de la plus petite gêne (e.g., vision floue) à un arrêt complet de l'expérience dû au malaise intense (e.g., envie de vomir, céphalées), touchent 60 à 80% d'individus qui utilisent des dispositifs immersifs (Cobb et al., 1999). Les technologies classiques sont désormais relativement acceptées par les utilisateurs grand public (e.g., téléphones portables, tablettes, etc.), mais les technologies du virtuel peuvent être perçues comme étant très/trop innovantes et sont susceptibles d'être plus souvent rejetés par le grand public du fait d'une mauvaise expérience utilisateur pendant l'interaction dû notamment aux malaises.

Deuxièmement, nous observons que les quelques modèles de la littérature qui s'intéressent au sujet de l'UX des EVI restent partiels ou très spécifiques à un seul domaine (e.g., divertissement, apprentissage) et à un seul dispositif (e.g., simulateur

d'EVI à six axes, écran 3D stéréoscopique, salle immersive stéréoscopique à 3 murs de projection). C'est le cas des modèles que nous avons présentés (i.e., Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Lin & Parker, 2007). De plus ces derniers proposent différentes approches pour aborder l'UX des EVI. Par exemple, au travers des caractéristiques de l'environnement virtuel (e.g., largeur du champ visuel) et de l'utilisateur (e.g., expérience précédente) qui impactent l'UX, au travers des composants de l'UX qui créent le flow et des composants qui en sont la conséquence et au travers des composants de l'UX qui créent l'acceptabilité et l'adoption des technologies d'EVI.



# CHAPITRE III. PROPOSITION D'UN MODELE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF

## **1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous nous focalisons tout d'abord sur plusieurs théories provenant des études de Cheng et al. (2014), Shin et al. (2013), Lin et Parker (2007) et Mahlke (2008) pour construire notre modèle. Ces théories regroupent à notre sens les composants clés à prendre en compte dans une UX en EVI. Établir un tel modèle de l'UX des EVI est utile pour deux raisons. Tout d'abord, ce modèle d'UX forme un cadre méthodologique pour la recherche sur les IHEVI. En effet, un tel cadre permet aux chercheurs d'explorer les relations entre les composants de présence, d'immersion, d'engagement, de compétence, d'émotion, de flow, d'utilisabilité, d'adoption de la technologie, de jugement et de conséquence de l'expérience dans les EVI. En outre, ce modèle permet aux praticiens de proposer de meilleures UX dans les EVI qu'ils conçoivent en se focalisant sur les caractéristiques du système et celles de l'utilisateur.

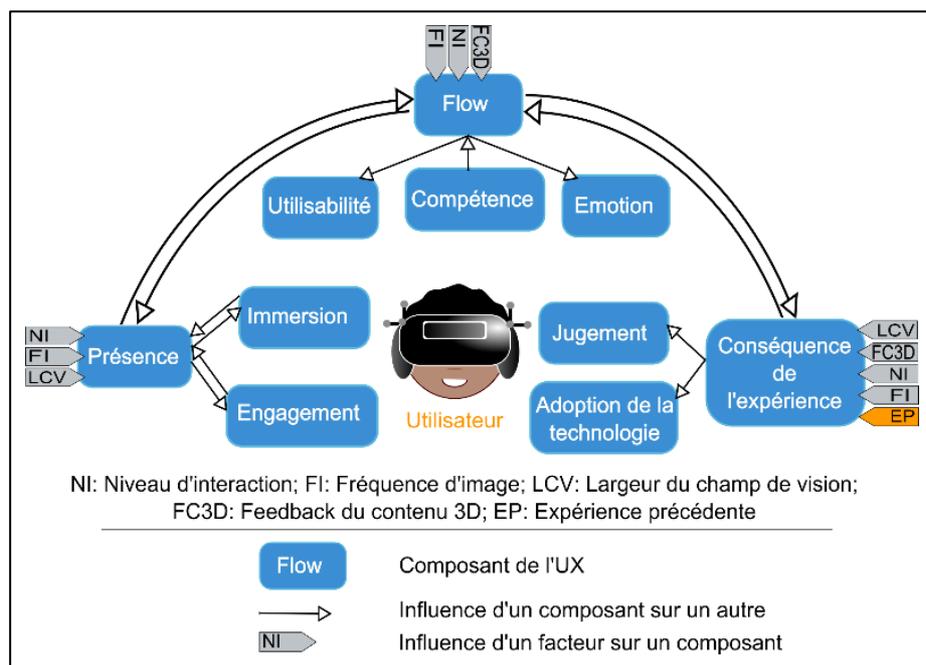
## **2. Vers un modèle de l'expérience utilisateur en interaction homme-environnement virtuel immersif**

Le but des travaux de recherche développés dans le cadre de cette thèse est de proposer un modèle holistique qui prend en compte l'ensemble des composants clés de l'UX jouant un rôle dans les IHEVI. Nous observons que les modèles et questionnaires présentés, tout particulièrement ceux traitant de l'UX des EVI dans les sections précédentes comportent des éléments de similitudes dans les composants qu'ils introduisent et dans les relations qu'ils entretiennent. Toutefois, nous constatons que chacun de ces modèles, de par leur spécificité à certains environnements (e.g., apprentissage, divertissement, salle immersive, casque de réalité virtuelle) aborde une représentation partielle de l'UX. Nous avons observé que chacun d'eux présente une approche différente à la fois dans la définition et la mesure des composants UX des EVI rendant ainsi ces modèles complémentaires. Les modèles respectifs de Cheng et al. (2014) de Lin et Parker (2007) sont préférentiellement adaptés au domaine du divertissement tandis que le modèle de Shin et al. (2013) est principalement adapté à l'apprentissage. Ces trois modèles introduisent les notions de flow et de présence ou s'en rapprochent dans une moindre mesure mais Shin et al. (2013) abordent plutôt celles se rapportant à l'immersion et à l'utilisabilité alors que Lin et Parker abordent celle des conséquences de l'expérience. Tout comme Lin et Parker (2007), Cheng et al. (2014) décrivent, quant à eux, les notions de l'émotion ou celles s'y rapprochant mais Cheng et al. (2014), ainsi que Shin et al. (2013) s'intéressent également à la notion d'adoption de la technologie. Par ailleurs, Cheng et al. (2014) s'intéressent aux compétences et Lin et Parker (2007) à l'engagement. Ces éléments posent les bases de notre propre modèle d'expérience utilisateur en EVI. Après avoir présenté notre modèle d'UX adapté aux EVI « Immersive Virtuel Experience Model » (IVEM), nous détaillons les composants clés de l'UX en EVI, leur interdépendance ainsi que l'impact des facteurs d'influence sur l'UX à partir des modèles représentatifs de l'UX que nous avons décrits précédemment. En effet, chaque composant apporte une part de garantie d'une bonne expérience à l'UX des EVI. Nous rappelons que ces composants représentent les perceptions et les réponses de l'utilisateur lorsque celui-

ci est immergé dans un EVI de divertissement, d'apprentissage ou réunissant les deux domaines en même temps (i.e., ludo-éducatif).

## 2.1 Le modèle d'expérience utilisateur adapté aux environnements virtuels immersifs

Notre modèle théorique « Immersive Virtuel Experience Model » (IVEM) repose sur les quatre modèles d'UX de Cheng et al. (2014), Shin et al. (2013), Lin et Parker (2007) et Mahlke (2008). En effet, il regroupe les différents concepts clés abordés dans ces différents travaux scientifiques : la présence (i.e., Cheng et al., 2014 ; Gaggioli et al., 2003), l'immersion (i.e., Shin et al., 2013 ; Lin & Parker, 2007), l'engagement (i.e., Lin & Parker, 2007 ; Witmer & Singer, 1998), le flow (i.e., Cheng et al., 2014 ; Csikszentmihalyi, 1990), l'utilisabilité (i.e., Loup-Escande & Lécuyer, 2014 ; (Shin et al., 2013), les compétences (i.e., Cheng et al., 2014 ; Kettanurak et al., 2001), les émotions (i.e., Mahlke, 2008 ; Hassenzahl, 2001), les conséquences de l'expérience (i.e., Mahlke, 2008 ; Nichols et al., 2000), le jugement (i.e., Mahlke, 2008 ; Hassenzahl, 2001), l'adoption de la technologie (i.e., Wu et al., 2009 ; Roca et al., 2006) et les facteurs influents de l'environnement virtuel immersif (voir Figure 12 ; FC3D, FI, LCV, NI) et de l'utilisateur (EP) (i.e., Shin et al., 2013 ; Lin & Parker, 2007).



**Figure 12. Modèle IVEM**

Ce modèle est issu de théories provenant des domaines les plus souvent visés par les IHEVI (i.e., apprentissage, divertissement, ludo-éducatif). L'expérience utilisateur est

mesurée ici par les trois composants principaux de présence, de flow et de conséquence de l'expérience. Des sous-composants leur sont associés.

Il postule que des conséquences de l'expérience (e.g., « mal du simulateur », stress, vertige) faibles favorisent le sentiment de présence et l'état de flow. De plus, le degré d'engagement et le ressenti d'immersion sont deux composants qui contribuent au sentiment de présence. En outre, les compétences perçues influencent l'état de flow qui en retour impacte l'émotion et l'utilisabilité. Finalement, les conséquences de l'expérience modulent le jugement global de l'IHEVI et l'adoption de la technologie. Ce modèle théorique repose également sur les facteurs influençant l'UX et suggère que la largeur du champ de vision, la fréquence d'images, le niveau d'interactivité, les feedbacks du contenu 3D (FC3D), les expériences précédentes de l'utilisateur constituent autant de facteurs qui impactent l'UX. Nous explicitons ces liens ci-après :

- La **présence**, le **flow** (e.g., divertissement, plaisir, satisfaction, etc.) et les **conséquences de l'expérience** (e.g., anxiété, céphalées, nausées, etc.) sont fondamentalement liés (Lin & Parker, 2007). La présence et le flow s'influencent positivement (Shin et al., 2013), tout comme le flow et les conséquences de l'expérience (Cheng et al., 2014).
- L'**immersion** et l'**engagement** permettent à l'utilisateur d'expérimenter un sentiment de présence (Lin & Parker, 2007).
- Les **compétences** déterminent le flow (Cheng et al., 2014) qui en retour influence l'**utilisabilité** (Shin et al., 2013) et les **émotions** (Cheng et al., 2014).
- Les **conséquences de l'expérience** influencent le **jugement** et l'**adoption de la technologie** (Mahlke, 2008).
- La **largeur du champ visuel**, la **fréquence d'images**, le **niveau d'interactivité** sont des variables de l'environnement qui influencent la présence (Lin & Parker, 2007).
- La fréquence d'image, le niveau d'interactivité et les **feedbacks du contenu 3D** (i.e. repères visuels) influencent quant à eux le flow (Lin & Parker, 2007).
- Les **expériences précédentes** de l'utilisateur (i.e., le facteur influent de l'utilisateur), la fréquence d'images, le niveau d'interactivité et les feedbacks du contenu 3D influencent les conséquences de l'expérience utilisateur (Shin et al., 2013 ; Lin & Parker, 2007).

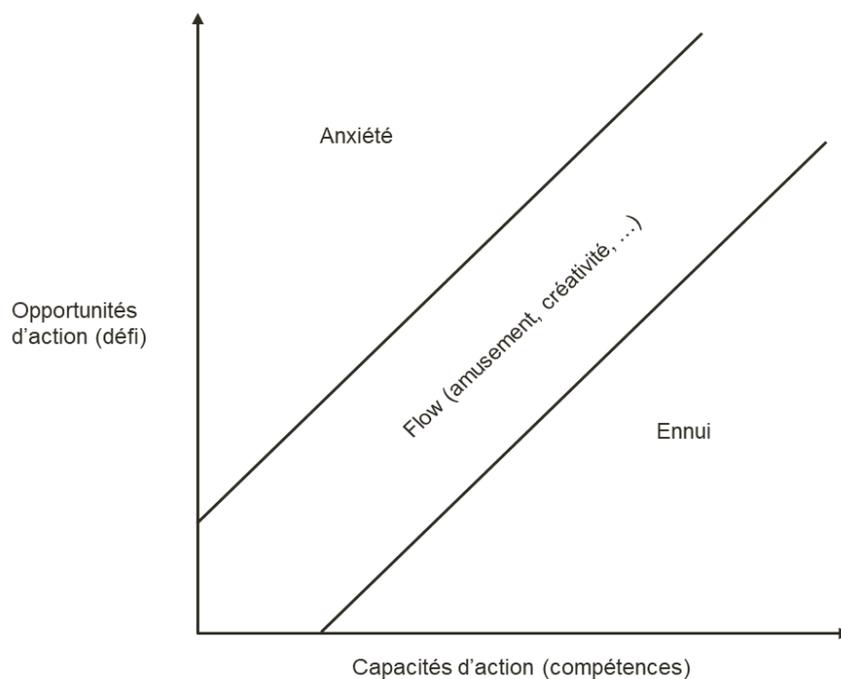
## 2.2 Les composants clés du modèle IVEM

### 2.2.1 Le flow : état subjectif optimal

La théorie du flow a été proposée par Csikszentmihalyi (1975) dans l'objectif d'explorer l'état psychologique de l'être humain lorsqu'il est complètement absorbé dans une activité particulière. Il affirme que le flow est un état durant lequel l'être humain ressent un haut niveau de maîtrise ou contrôle de ses compétences mais aussi beaucoup de joie et de divertissement (Csikszentmihalyi, 1990). Plus spécifiquement, le flow peut se traduire par une attention et concentration intense sur l'activité, un

ressenti de perte d'inhibition, un sentiment de connaissance et de contrôle complet de l'action, une distorsion du temps et une motivation intrinsèque. Dans le cadre des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), Skadberg et Kimmel (2004) rapportent que le flow est caractérisé par la distorsion du temps, le divertissement et la téléprésence. En 2014, Nakamura et Csikszentmihalyi identifient deux conditions nécessaires à son établissement:

- Un équilibre entre les compétences de l'utilisateur et le défi représenté, autrement dit l'utilisateur perçoit que l'activité correspond exactement à ses capacités qui ne sont pas sous-utilisées, ni surutilisées (Figure 13).
- Des buts clairs, précis et réguliers dans le temps ainsi qu'un retour (ou feedback) immédiat des progrès.



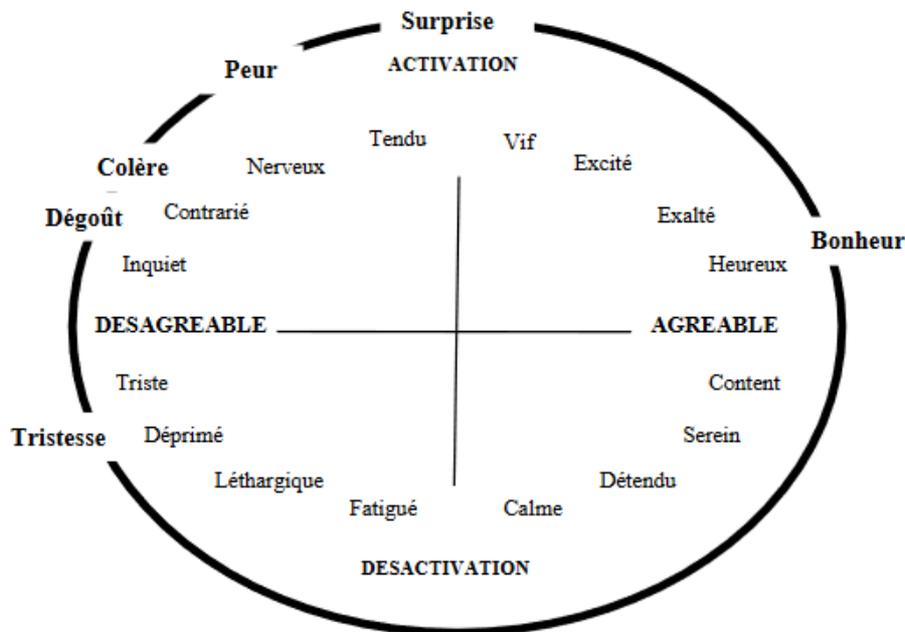
**Figure 13. Modèle de flow de Nakamura & Csikszentmihalyi, 2014 (notre traduction)**

Cet état subjectif survient aussi bien dans un contexte d'apprentissage, de travail que de divertissement (Csikszentmihalyi & LeFevre, 1989). Comme nous l'avons vu précédemment, Cheng et al. (2014) axent l'UX dans un EVI autour de l'état de flow. Cependant, ce dernier n'est pas un composant spécifique aux environnements virtuels.

### 2.2.2 L'émotion : résultat de l'évaluation cognitive de l'Environnement Virtuel Immersif

Tout comme le flow, l'émotion est également un composant subjectif. Selon Mahlke et Mingé (2006), deux théories principales structurent les émotions. Une première approche discrète, celle de Ekman (1992) qui considère l'existence de cinq émotions

universelles de base (i.e., la colère, la peur, la joie, la tristesse et le dégoût) et une seconde théorie, celle de Russel (1980) dépeint plutôt l'émotion à travers un modèle « circomplexe » croisant deux dimensions (Figure 14) – i.e., activation/désactivation et agréable/désagréable – (voir aussi Russell & Barrett, 1999).

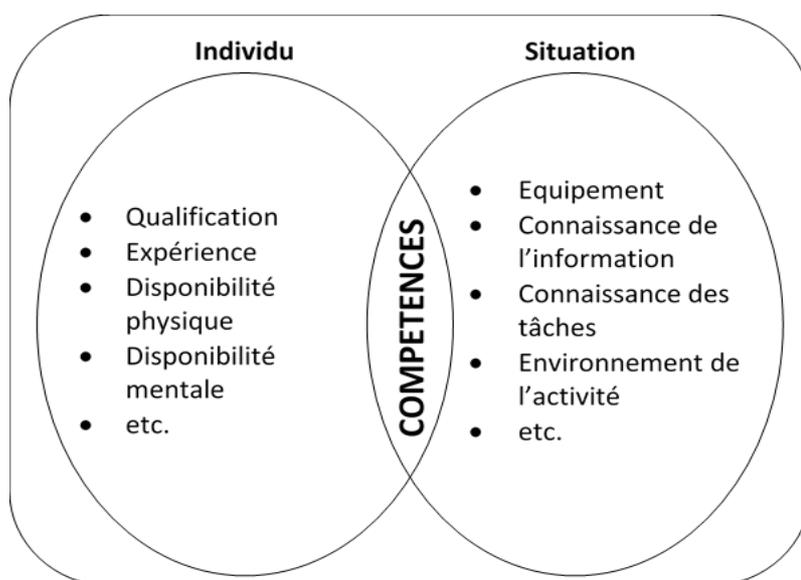


**Figure 14. Modèle circomplexe de l'affect central croisant deux dimensions de Russel et Barrett (1999)**

Les psychologues s'accordent toutefois sur le fait que le terme « émotion » renvoie à « une réalité psychique complexe qui implique des processus d'évaluation cognitive du flux d'informations internes ou externes à l'individu, des sensations d'excitation et plaisir (ou déplaisir) qui y sont associées, des changements physiologiques et un comportement émotif, habituellement dirigé vers un but, adaptatif » (Piolat & Bannour, 2008, p. 2). En ce qui concerne l'évaluation cognitive, il s'agit d' « une évaluation subjective, directe, immédiate et intuitive, consciente ou inconsciente d'un certain nombre de critères ou dimensions qui seraient pertinents pour l'utilisateur » (Nugier, 2009, p. 10). Ainsi, lors d'une Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif, l'individu évalue de manière instinctive son expérience dans l'EVI, mobilisant ainsi des affects tels qu'une joie, une exaltation, une contrariété ou encore une inquiétude dominante, comme étant l'indication d'une expérience agréable ou désagréable pour lui. Une émotion est donc une réaction soudaine de l'utilisateur avec une composante cognitive (i.e., qui se manifeste dans l'esprit), mais aussi physiologique (i.e., qui se manifeste dans le corps) ou comportementale (i.e., qui se manifeste par les actions).

### 2.2.3 Les compétences : à l'intersection de l'individu et de la situation

Deux besoins sont récurrents dans la littérature scientifique concernant l'usage d'un EVI : l'acquisition de nouvelles compétences et le divertissement. De nouvelles compétences peuvent être acquises par l'utilisateur à travers des EVI de deux types : des EVI d'apprentissage – e.g., formation professionnelle, enseignement scolaire etc. (Baudouin et al., 2007 ; Buche, 2005) - ou des EVI d'apprentissage couplés à une activité de divertissement – e.g., jeu ludo-éducatif, jeu sérieux, etc. (Mader et al., 2012 ; Marne et al., 2011). Le besoin de divertissement de l'utilisateur est généralement comblé par une expérience ludique dans un EVI (e.g., jeu ludique, jeu ludo-éducatif, jeu sérieux). Bien que les aspects liés au divertissement soient importants dans une expérience ludique, l'accent est également mis sur les compétences de l'utilisateur qui sont une indication d'efficacité et d'efficience (Deci, 1975 ; White, 1959) de l'EVI. Selon Dreyfus (2004), les compétences sont caractérisées par cinq stades d'évolution, à long ou moyen terme : le novice<sup>25</sup>, le débutant<sup>26</sup>, le compétent<sup>27</sup>, le performant<sup>28</sup> et l'expert<sup>29</sup>.



**Figure 15. Illustration des compétences à l'intersection de deux entités de Everaere, 2000 (notre traduction)**

<sup>25</sup> Il n'a aucune expérience de la situation à laquelle il est confronté.

<sup>26</sup> Il commence à reconnaître les cas de figures typique d'usage, mais un nouveau cas de figure le déstabilise.

<sup>27</sup> Il commence à repérer les informations importantes, il échappe à la précipitation et au traitement désordonné de l'urgence.

<sup>28</sup> Il commence à comprendre rapidement une situation qu'il peut anticiper dans une certaine mesure. Une perception un peu plus intuitive l'emporte sur une réflexion consciente. Son geste est sûr mais il ne parvient pas forcément à l'expliquer.

<sup>29</sup> Il dépasse tous les autres en termes d'efficacité de l'action. Il sait faire, comprendre, expliquer les processus en jeu dans l'action réussie.

Everaere (2000) rappelle que les compétences varient quotidiennement suivant l'état de fatigue, de l'humeur, des préoccupations de l'utilisateur mais aussi suivant la situation dans laquelle l'activité est réalisée. Celle-ci dépend du type d'équipement utilisé, du type d'information diffusé, du type de tâche à réaliser, de l'environnement, etc (Figure 15).

#### 2.2.4 L'utilisabilité : aspect instrumental et pragmatique de l'expérience utilisateur

D'après les définitions les plus répandues (Abran et al., 2003) et la norme ISO 9241-11 : 1998, l'utilisabilité désigne les facilités d'apprentissage et d'utilisation caractérisées par l'apprenabilité<sup>30</sup>, la mémorisation<sup>31</sup>, l'efficacité<sup>32</sup>, l'efficience<sup>33</sup> et la satisfaction<sup>34</sup> (Brangier & Barcenilla, 2003 ; Dix et al., 1993 ; Nielsen, 1993). L'adéquation du système aux attentes des utilisateurs (Peraya & Champion, 2006), à ses capacités cognitives, motrices et sensorielles (Calvary, 2002) regroupe autant de composants qui viennent compléter la notion d'utilisabilité.

L'utilisabilité s'inscrit fortement dans le processus de conception d'IHM. Son étude a contribué à la prise en compte de l'utilisateur au centre du processus de conception, mais aussi, à systématiser la pratique des méthodes ergonomiques à travers la certification et les normes ISO (Barcenilla & Bastien, 2009). Pour en citer quelques unes, les normes ISO 20282-1 : 2006 (2006) et ISO-TR 16982 : 2002 (2002) traitent des méthodes d'utilisabilité pour la conception centrée sur l'opérateur. Déjà liée aux performances et compétences de l'utilisateur, l'utilisabilité est associée à l'aspect instrumental ou pragmatique de la mesure de l'expérience utilisateur (Mahlke, 2008 ; Hassenzahl & Tractinsky, 2006). Il s'agit d'un déterminant nécessaire, mais seul, il reste insuffisant pour assurer un usage effectif de tous systèmes interactifs (Dillon & Morris, 1999) et donc des EVI. Depuis une dizaine d'années, les recherches sur les aspects non-instrumentaux ou hédoniques (i.e., jugement subjectif, divertissement, plaisir, bien-être, etc.), en opposition avec les aspects instrumentaux et pragmatiques, se développent avec l'ambition de mieux comprendre ces nouvelles interactions homme-machine (Lesage & Dorta, 2008).

#### 2.2.5 La présence virtuelle ou téléprésence : expérience psychologique

La présence fait référence à un état subjectif et psychologique qui donne l'illusion de se sentir « réellement là » dans un environnement virtuel plutôt que réel. Aussi appelé

---

<sup>30</sup> Facilité d'apprentissage appréciée lors de la première confrontation au produit ou après une période d'inactivité. Elle désigne également l'amélioration et la stabilité de la performance dans le temps.

<sup>31</sup> Résultat des apprentissages, c'est-à-dire la consolidation plus ou moins stable des connaissances en mémoire pour leur usage ultérieur.

<sup>32</sup> Concerne la précision ou degré d'achèvement des objectifs spécifiés.

<sup>33</sup> Capacité de produire une tâche donnée avec le minimum d'effort. Plus l'effort est faible, plus l'efficience est élevée.

<sup>34</sup> C'est une évaluation subjective provenant d'une comparaison entre ce que l'acte d'usage apporte à l'individu et ce que ce dernier s'attend à recevoir.

présence virtuelle, ce concept largement étudié est très souvent utilisé dans un contexte de « réalité virtuelle » ou environnement virtuel (Witmer & Singer, 1998 ; Biocca, 1997 ; Lombard & Ditton, 1997 ; Held & Durlach, 1992 ; Loomis, 1992 ; Steuer, 1992). En dehors de ce contexte, la présence dite « évoquée » désigne l'expérience d'une personne qui, pendant un instant plus ou moins long, se soustrait « mentalement » de son environnement immédiat réel pour se plonger dans une réalité évoquée, par exemple à travers la lecture d'un livre, le récit d'une tierce personne, le visionnage d'un film, etc (Pillai et al., 2013).

Le terme de « téléprésence », initialement utilisé dans le cadre d'une activité réalisée dans un environnement à distance telle qu'une opération chirurgicale à distance ou encore le télétravail (Minsky, 1980), est de plus en plus utilisé pour désigner exclusivement la présence dans le contexte des environnements virtuels et environnements ou réalité mixte(s) – e.g., associations d'éléments réels et virtuels dans un environnement – (Chalon & David, 2004). Toutes ces énumérations de la présence (i.e., présence virtuelle ou évoquée, téléprésence) renvoient à la notion de présence physique ou de présence spatiale de l'utilisateur (i.e., le fait de se sentir mentalement « transporté » dans un autre espace), en opposition à la présence incarnée (i.e., sentiment que mon « moi » virtuel est réellement moi), la co-présence (i.e., sentiment de présence d'un autre dans l'EVI également conscient de ma présence) et la présence sociale (i.e., sentiment de présence et d'appartenance à un groupe dans l'EVI). Ces deux dernières catégories de présence, contribuent à mieux identifier l'UX dans des environnements virtuels collaboratifs ou coopératifs où par exemple la communication est possible (Eynard, 2016).

La présence reste un composant souvent difficile à caractériser (Slater, 2003) autant pour les chercheurs (Slater, 1999) que pour les concepteurs (Bowman & McMahan, 2007). Nombre d'études sont encore menées dans le but d'identifier les facteurs en cause dans le sentiment de présence (Alsina-Jurnet & Gutiérrez-Maldonado, 2010 ; Witmer et al., 2005 ; Mikropoulos & Strouboulis, 2004 ; Nowak & Biocca, 2003 ; Zimmons & Panter, 2003). Pour résumer les différents concepts de la présence et expliciter notre positionnement, nous dirons que le sentiment de présence est un état psychologique dans un environnement virtuel comparable à un état psychologique dans un environnement réel (Witmer & Singer, 1994). Cela signifie que même si l'utilisateur est conscient qu'il est dans un environnement virtuel, il ne peut s'empêcher d'y réagir comme si c'était réel (e.g., réflexe d'éviter une balle virtuelle lancée vers lui, sursaut de peur lorsqu'une créature virtuelle surgit subitement). Slater et al. (1994) affirment que la présence constitue une réponse psychologique de chaque personne au fait d'être plongée dans un EVI. Elle dépend de leur capacité à créer son propre schéma mental de la réalité (Sheridan, 1992).

## 2.2.6 L'immersion : expérience sensorielle

L'immersion fait référence au ressenti d'être réellement « enveloppé » par l'EVI. Il s'agit d'une dimension qui distingue les environnements virtuels non-immersifs (e.g., écran d'ordinateur, de TV, etc.) des environnements virtuels immersifs (e.g., casque

de réalité virtuelle, salle immersive, etc.). Le sentiment d'immersion est principalement provoqué par la technologie : plus celle-ci est inclusive (i.e., représente une barrière aux stimuli extérieurs, du réel), extensive (i.e., comporte le plus de technologies sensorielles), enveloppante (i.e., les stimuli viennent de toutes les directions quelle que soit la position de l'utilisateur), riche et variée, plus le degré d'immersion est élevé. Un environnement virtuel est donc plus ou moins immersif selon le degré de stimuli sensoriels générés artificiellement censés supplanter les stimuli de l'environnement réel au regard des sens de l'utilisateur (Slater & Wilbur, 1997).

L'immersion se distingue de la présence et est vue comme un concept à part entière (Bowman & McMahan, 2007). En effet, un EVI bien conçu, en matière d'immersion, ne mène pas nécessairement au sentiment de présence pour toutes personnes (e.g., difficulté à s'incarner dans un avatar, « l'illusion » ne s'opère pas, manque de confiance dans ses capacités techniques, culture ou vision différente). De même qu'une personne peut se sentir présente avec un faible degré d'immersion. Selon Slater et al. (1994), l'immersion est le degré de correspondance des données sensorielles générées par l'EVI (e.g., représentation visuelle, déplacement) avec les sens de l'utilisateur (e.g., proprioception, vision, toucher, écoute, etc.). Cette correspondance aide l'utilisateur à s'immerger de manière sensorielle dans une autre réalité (i.e., celle de l'EVI) et donc contribue à son sentiment de présence. Witmer et Singer (1998) apportent par ailleurs à cette définition une dimension psychologique, pour eux l'immersion est l'état psychologique de se sentir immergé dans l'EVI grâce aux stimuli.

### 2.2.7 L'engagement : réponse volontaire et contrôle

La notion d'engagement se développe dans les domaines de divertissement, d'apprentissage ou encore du management des entreprises. La question est de savoir ce qui motive une personne à s'engager volontairement dans une activité ou expérience de divertissement, professionnelle ou d'apprentissage. Le jeu de façon générale ayant depuis longtemps répondu à cette question de l'engagement (Triclot, 2011), certaines caractéristiques lui sont empruntées pour stimuler l'engagement dans des activités professionnelles ou d'apprentissage (e.g., jeux sérieux, activité ludo-éducative, gamification, ...) (Bonenfant & Genvo, 2014 ; Haudegond, 2013). Dans un contexte général, l'engagement renvoie au degré d'énergie, de force ou encore de volonté avec lequel une personne souhaite atteindre ses objectifs dans une situation donnée (e.g., obtenir de bonnes notes aux examens ou un bon score pour passer au niveau supérieur dans un jeu, etc.).

Dans le cadre des EVI, l'engagement est, d'après Witmer et Singer (1998), le degré d'attention et d'énergie qu'une personne accorde à des stimuli, une activité ou un événement particulier dans l'EVI. Cette attention et énergie portée dépendent du degré d'importance ou de sens donné aux stimuli, à l'activité ou à l'événement. L'engagement est par ailleurs souvent associé à la présence comme un composant qui caractérise la présence (Sallnäs, 2005 ; Grigorovici & Constantin, 2004). Or pour

Slater (2003, 1999), l'engagement est un composant bien à part qui ne caractérise pas nécessairement la présence. Klimmt et Vorderer (2003) défendent également cette affirmation et différencient l'*attention* « automatique » ou « involontaire » dont il est question dans la présence, de l'attention contrôlée (« volontaire ») dont il est question dans l'engagement.

### 2.2.8 Les conséquences de l'expérience : théorie du conflit visuo-vestibulaire

Plusieurs études (Lampton et al., 1994 ; Piantanida et al., 1993 ; Regan & Price, 1993 ; Chung et al. 1989) ont rapporté des effets secondaires ressentis pendant et après l'utilisation des premières générations d'EVI par les participants au cours des expérimentations. Parmi d'autres chercheurs, McCauley et Sharkey (1992) ont anticipé l'apparition de ces effets pour les environnements virtuels et pour les systèmes de téléopération (e.g., télé médecine, microrobotique, etc.) compte tenu de ce qui était observé dans le cas des simulateurs militaires de vol ou de conduite depuis les années 1950. Depuis, plusieurs autres auteurs (Kolasinski, 1996 ; Regan & Ramsey, 1996 ; Wilson, 1996 ; Regan & Price, 1994 ; Biocca, 1992 ; Kennedy et al., 1992) se sont penchés sur ces effets indésirables pour mieux les identifier et tenter de les prévenir. La théorie du conflit visuo-vestibulaire est la théorie la plus répandue quant à l'explication de ce mal (Cobb et al., 1999) : le corps réel d'un individu dans un EVI est souvent statique alors que l'environnement virtuel est en mouvement ; son système vestibulaire lui renvoie alors des informations d'un non-mouvement, alors que son système visuel lui renvoie les informations d'une certaine intensité de mouvement, ce qui crée un conflit visuo-vestibulaire et provoque ainsi un mal-être.

Ces effets secondaires sont nommés *cybersickness* par McCauley et Sharkey (1992), que l'on peut traduire littéralement par « la maladie du cyber espace ». Cette dénomination (i.e., *cybersickness*) est reprise par un grand nombre de chercheurs anglophones et francophones. La traduction française est plus incertaine mais on trouve parfois le « mal du simulateur » (Burkhardt et al., 2003) pour désigner les effets secondaires ressentis dans un EVI et dans un simulateur. Le terme *cybersickness* est nommé ainsi en référence au *simulator sickness* ou mal des simulateurs et au *motion sickness* ou mal des transports ou encore cinétose. On retrouve souvent une confusion entre ces trois appellations. Même si les symptômes provoqués sont semblables, leur intensité, leur ordre d'apparition et leurs causes distinguent ces trois maux, comme le rappellent Stanney et al. (1997). Cobb et al. (1999) nomment ces effets secondaires « Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects » ou « VRISE » (traduction littérale : effets et symptômes induits par la réalité virtuelle) de manière à bien les distinguer de ses homologues (i.e., simulateur, transport réel). Ce mal des environnements virtuels se traduit concrètement par un ensemble de symptômes (LaViola JR, 2000), comme par exemple : une fatigue visuelle, une diplopie<sup>35</sup>, des maux de tête, une pâleur, une transpiration, une

---

<sup>35</sup> Trouble oculaire provoquant la vision en double des objets.

sècheresse buccale, une sensation de ventre plein, une désorientation, des vertiges, une ataxie<sup>36</sup>, des nausées, des vomissements.

Aujourd'hui encore, même si ces symptômes ne sont plus considérés comme une menace à la pérennité des environnements virtuels, ils restent un défi majeur étant donné qu'ils peuvent provoquer un désengagement, voire un arrêt complet de l'expérience ainsi qu'un rebut de ce type de technologies.

Les trois approches principales pour répondre à ce défi proposent d'identifier :

- les caractéristiques de l'individu et donc sa propension à déclencher ces symptômes (e.g., âge, sexe, problème de santé, posture, etc.);
- les caractéristiques du système qui provoquent ces mêmes symptômes (e.g., latence, tremblement, calibration, ergonomie, ...);
- les caractéristiques de la tâche conduisent à ces maux (e.g., niveau de contrôle de l'EVI, temps d'exposition, etc.) (Davis et al., 2014 ; Kolasinski, 1996).

Un phénomène d'adaptation au mal des environnements virtuels a pu être observé, notamment chez les pilotes d'avion qui passent régulièrement du temps dans des simulateurs de vol à des fins d'entraînement. Ce constat a fait naître l'idée de programmes d'adaptation proposés à l'individu désireux de se « guérir » du mal des EVI (LaViola Jr, 2000 ; McCauley & Sharkey, 1992). Cependant, cette approche n'étant pas encore au point à ce jour, ce sont principalement les caractéristiques du système qui sont prises en compte dans la conception et l'évaluation d'EVI pour atténuer le mal des EVI.

## 2.2.9 L'adoption de la technologie

La question de l'adoption d'une technologie par un groupe d'individus se pose dans le cadre d'une technologie nouvelle ou innovante comme celle mobilisée dans les EVI, à savoir si celle-ci a une probabilité forte d'être utilisée dans le futur ce groupe. Greenhalgh et al. (2004) remarquent que certaines innovations ne sont jamais adoptées alors que d'autres sont adoptées puis diffusées à d'autres par ces « adopteurs » ou encore simplement adoptées puis abandonnées. L'adoption de la technologie peut ainsi être définie comme « *le degré d'intégration<sup>37</sup> et d'appropriation<sup>38</sup> d'une technologie dans un contexte d'usage* » (Barcenilla & Bastien, 2009, p. 331). Les recherches autour de l'acceptation, l'intention d'adopter, l'adoption, l'intention de continuer à utiliser une technologie par un groupe d'individus ont fait naître plusieurs théories de l'acceptabilité comme par exemple la théorie de la diffusion de l'innovation (Rogers, 1983), la théorie de l'action raisonnée (Fishbein & Ajzen, 1975), la théorie du comportement planifié (Ajzen, 1985) ou le modèle d'acceptabilité de la technologie (Davis, 1989). D'après celles-ci, plusieurs facteurs influencent les choix d'un individu quant à l'acceptation ou le rejet d'une

---

<sup>36</sup> Absence de coordination des mouvements.

<sup>37</sup> Adéquation d'une technologie dans un nouveau contexte d'usage

<sup>38</sup> Utilisation conforme à leur besoin d'une technologie mise à disposition des utilisateurs

technologie. Toutefois, toutes s'accordent à dire que l'intention d'utiliser ou l'usage de la technologie par l'individu relève des croyances et des perceptions de l'utilisateur telles que les émotions (Zhang & Li, 2004) ou l'utilisabilité et le divertissement (Igarria et al., 1994 ; Davis et al., 1992).

### 2.2.10 Le jugement global

Tout comme l'adoption de la technologie, le jugement global est une conséquence des perceptions de l'utilisateur lorsqu'il utilise une technologie. Selon Mahlke (2002), les perceptions instrumentales (e.g., l'utilisabilité) aussi bien que les perceptions hédoniques (e.g., l'esthétique, la symbolique) jouent un rôle déterminant dans le jugement global de la technologie par l'utilisateur. Hassenzahl (2007) ajoute par ailleurs que le jugement d'attractivité dépend également du contexte de l'usage (e.g., type de tâche, objectif visé). Tous deux identifient le jugement esthétique (i.e., beau, laid) et le jugement de valeur (i.e., bien ou bon, mauvais) comme des métriques du jugement global.

## 2.3 L'interdépendance des composants du modèle IVEM

### 2.3.1 Présence, flow et conséquences de l'expérience

Comme nous l'avons vu précédemment dans le modèle de Cheng et al. (2014), l'utilisateur entre en état de flow lorsqu'il se sent "téléprésent". Shin et al. (2013), qui ont examiné le rôle du flow et de la présence, ont observé leur interdépendance, ce qui nous permet de constater que chacun de ces composants joue un rôle de stimulateur pour l'autre composant. Lin & Parker (2007), qui ont investigué le degré de présence, de divertissement et de conséquences de l'expérience que les utilisateurs peuvent ressentir dans un EVI, ont trouvé la présence et le divertissement étaient positivement corrélés tandis que le divertissement et les conséquences de l'expérience étaient négativement corrélés. Autrement dit, lorsque le sentiment de présence augmente, le divertissement ressenti augmente également et inversement. Et lorsque le divertissement augmente les conséquences de l'expérience ressentie sont moindres, de même lorsqu'elles augmentent c'est le divertissement ressenti qui est moindre. Zhou & Lu (2011) relie le flow et le divertissement, et confirment ainsi que l'expérience du flow inclut les perceptions de divertissement et d'attention (i.e., concentration).

### 2.3.2 Présence, immersion et engagement

L'immersion et l'engagement sont deux composants qui contribuent à l'idée de présence (Lin & Parker, 2007). En suivant l'approche de Witmer & Singer (1998), le sentiment d'immersion est ressenti lorsque l'utilisateur pose son attention et est engagé vers un ensemble de stimuli dans son activité ou vers un événement qui survient dans l'EVI, provoquant chez lui un sentiment psychologique de présence. Alors que l'immersion va être reliée aux stimuli synthétiques cohérents de l'EVI

(Bowman & McMahan, 2007), la présence va quant à elle être associée aux stimuli psychologiques créés par le sentiment d'être réellement présent dans l'EVI. Shin et al. (2013) considèrent également l'immersion comme clairement reliée au concept largement étudié de présence.

### 2.3.3 Flow, utilisabilité, compétence et émotion

D'après Shin et al. (2013), les utilisateurs qui se sentent en état de flow dans l'EVI veulent pouvoir percevoir l'utilité, la facilité d'utilisation du système et juger les éléments de ce dernier qui les satisfait. A travers ces trois sous-composants (i.e., utilité, facilité d'utilisation, satisfaction), Shin et al. (2013) décrivent le lien entre le flow et l'utilisabilité tandis que Cheng et al. (2014) confirment que l'expérience de l'interaction-homme-machine est génératrice d'émotions. Ces derniers ajoutent que cet état émotionnel est effectivement créé par un état de flow, tout en suggérant que les compétences influencent également cet état. Pour Csikszentmihalyi (1990), en réalité, l'état de flow provient d'un équilibre entre les propres compétences de l'utilisateur qu'il perçoit et le défi apporté par l'EVI.

### 2.3.4 Conséquences de l'expérience, jugement et adoption de la technologie

Selon l'étude de Shin et al. (2013), les conséquences de l'expérience peuvent altérer l'usage de l'EVI actuel d'un utilisateur, son intention d'utiliser à nouveau cette technologie et donc l'adoption de cette dernière. En effet, comme le révèlent Lin & Parker (2007), les effets secondaires dus à une expérience dans un EVI peuvent sévèrement déstabiliser l'utilisateur au point qu'il veuille mettre fin à toute exposition aux EVI. De plus, les conséquences de l'expérience, si elles ne sont pas contrôlées, pourraient contribuer de manière négative à l'UX. D'après Mahlke (2008), elles incluent l'acceptation et l'intention d'utiliser la technologie, le jugement global de la technologie et le comportement d'utilisation.

## 2.4 L'impact des facteurs d'influence sur les composants du modèle IVEM

L'Interaction Homme-Environnement Virtuel Immersif est modérée par divers facteurs d'influence qui peuvent fortement impacter l'UX. Par exemple, expérimenter un sentiment de présence requiert que l'utilisateur soit dirigé vers un certain ensemble de stimuli cohérents de l'EVI (e.g., largeur du champ visuel, perception de mouvement, etc.) et détourné des stimuli de l'environnement réel (Lin & Parker, 2007). Ces facteurs d'influence peuvent provenir de caractéristiques de l'EVI (e.g., largeur de champ visuel, niveau d'interactivité, etc.), de celles de l'utilisateur (e.g., prédispositions, besoins, attentes, expérience précédente, etc.), de celles du contexte (e.g., socio-culturel, organisationnel, etc.) et de celles du processus de conception (e.g., bonne intégration des besoins, choix d'outils de conception, etc.) – Mahlke, 2008 ; Lin & Parker, 2007 ; Hassenzahl & Tractinsky, 2006 ; Forlizzi & Ford, 2000.

Nous décrivons ci-après les caractéristiques de l'EVI et celles de l'utilisateur en jeu dans notre modèle.

#### 2.4.1 L'impact des caractéristiques de l'environnement virtuel immersif sur l'expérience utilisateur

Pour Lin & Parker (2007), la présence, déterminée par l'engagement et l'immersion, le flow déterminé par le divertissement (Zhou & Lu, 2011 ; Csikszentmihalyi, 1990) et les conséquences de l'expérience sont corrélés de manière significative avec le niveau d'interactivité dans l'EVI. Pour Cheng et al. (2014), c'est lorsqu'il interagit et qu'il perçoit que l'EVI est sous son contrôle que l'utilisateur entre dans un état de flow. Ils ajoutent qu'un niveau plus élevé d'interaction améliore les perceptions de sentiment de contrôle, de compétences et la probabilité qu'un sentiment de présence se crée chez l'utilisateur.

Ces auteurs affirment également que le divertissement (i.e. un des composants du flow), la présence (i.e., immersion et engagement) et les conséquences de l'expérience sont associés à la cadence du mouvement de la scène visuelle. Cheng et al. (2014) suggèrent quant à eux que c'est principalement la vivacité (i.e., la qualité de l'information affichée telle que la fréquence d'image) qui optimise la présence.

Lin & Parker (2007) révèlent encore qu'un haut niveau de présence est significativement associé à un champ de vision large de 180° alors que des effets secondaires ressentis à une moindre échelle sont significativement associés avec un champ de vision réduit à 60°. Ils démontrent également que le divertissement et les conséquences de l'expérience sont associés aux repères visuels (i.e., feedback visuels).

De plus, Mahlke (2008) présente les propriétés du système telles que la présentation (e.g., largeur du champ visuel, fréquence d'images), la fonctionnalité (e.g., niveau d'interactivité) ou le dialogue (e.g., feedback) comme des déterminants des perceptions, des émotions, du jugement, des choix et des comportements d'utilisation de l'utilisateur envers la technologie. Mahlke (2008) affirme également que ces propriétés du système impactent l'utilisabilité objective (i.e., taux de réalisation de la tâche, temps passé sur une tâche).

#### 2.4.2 L'impact des caractéristiques de l'utilisateur sur l'expérience utilisateur

Selon Cheng et al. (2014), un haut niveau d'implication (i.e., importance accordée à son rôle dans l'EVI), représenté par l'expérience de l'utilisateur (e.g., expert/novice) pousse l'utilisateur à développer de meilleures compétences et augmente la probabilité d'un sentiment de présence. Pour Shin et al. (2013), l'adoption de la technologie par l'utilisateur (e.g., intention d'utiliser la technologie) est influencée par des facteurs facilitants, comme par exemple son expérience précédente.

Pour Mahlke (2008), les caractéristiques de l'utilisateur, telles que les préférences esthétiques, les attentes ou besoins modelés par son expérience précédente ont un impact sur le ressenti subjectif de l'utilisateur (i.e., émotion). D'autres auteurs comme Geslin et al. (2011) confirment en outre que l'émotion de l'utilisateur dans l'EVI varie en fonction de son expérience précédente avec les EV. Par ailleurs, Plocher et al. (1999) confirment, comme Mahlke (2008), l'influence des caractéristiques de l'utilisateur sur l'utilisabilité objective.

### **3. Conclusion : synthèse des composants clés et facteurs d'influence**

Une synthèse des composants et des facteurs d'influence de notre modèle de l'UX pour les EVI est présentée dans les deux tableaux ci-dessous qui résument les composants (Tableau 24) et facteurs d'influence (Tableau 25) identifiés, leurs mots clés respectifs et l'étude source dont ils proviennent.

**Tableau 24. Composants des modèles source, de notre modèle et études sources identifiées pour la proposition de notre modèle IVEM**

Composants des modèles source	Composants de notre modèle	Sources
Présence, téléprésence	Présence	Cheng et al. (2014) ; Shin et al. (2013) ; Lin et Parker (2007)
Immersion	Immersion	Shin et al. (2013) ; Lin et Parker (2007)
Engagement	Engagement	Lin et Parker (2007)
Flow		
Attention	Flow	Cheng et al. (2014) ; Shin et al. (2013) ; Lin et Parker (2007)
Divertissement		
Compétence		
Défi	Compétence	Cheng et al. (2014)
Plaisir		
Affect positive	Emotion	Cheng et al. (2014) ; Lin et Parker (2007)
Fidélisation		
Intention d'utiliser	Adoption de la technologie	Cheng et al. (2014) ; Shin et al. (2013)

**Tableau 24 (suite). Composants des modèles source, de notre modèle et études sources identifiées pour la proposition de notre modèle IVEM**

<b>Composants des modèles source</b>	<b>Composants de notre modèle</b>	<b>Sources</b>
Confirmation		
Utilité perçue	Utilisabilité	Shin et al. (2013) ; Lin et Parker (2007)
Facilité d'utilisation perçue		
Satisfaction		
Cybersickness	Conséquence de l'expérience	Lin et Parker (2007)
Jugement global	Jugement global	Mahlke (2008) ; Hassenzahl (2000)

**Tableau 25. Facteurs d'influence des modèles sources, de notre modèle et études sources identifiées pour la proposition de notre modèle IVEM**

<b>Facteurs d'influence des modèles source</b>	<b>Facteurs d'influence de notre modèle</b>	<b>Sources</b>
Interactivité, niveau d'interactivité, vivacité	Niveau d'interactivité	Lin et Parker (2007)
Implication, expérience précédente	Expérience précédente	Lin et Parker (2007)
Champ de vision	Largeur du champ de vision	Lin et Parker (2007)
Vision stéréoscopique	Vision stéréoscopique	Lin et Parker (2007)
Mouvement visuel	Fréquence d'images	Lin et Parker (2007)
Repères visuels	Feedback du contenu 3D	Lin et Parker (2007)
Implication, expérience précédente	Expérience précédente	Shin et al. (2013)



# CHAPITRE IV. PROPOSITION D'UN QUESTIONNAIRE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence internationale : "Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2017). A questionnaire to measure the User Experience. In *Proceedings of the 18th Virtual Reality International Conference (VRIC 2016)*. Laval: ACM"



## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la conception d'un outil de mesure sous forme de questionnaire. Le choix d'un tel outil nous permet d'opérationnaliser notre modèle IVEM et de proposer un outil simple d'utilisation pour les concepteurs d'EVI. Il permet de recueillir les données nécessaires à l'application du modèle. Le questionnaire est actuellement la méthode la plus utilisée pour mesurer l'UX ou ses composants (e.g., présence, engagement, immersion, flow, émotion, ...) puisqu'il s'agit d'une manière efficace et rapide d'obtenir les perceptions et les retours d'expérience des utilisateurs finaux. De plus, un grand nombre de questionnaires ont été validés et considérés comme fiables pour convenir aux entreprises. La plupart des questionnaires que nous avons identifiés mesurent un ou deux composants de notre modèle en même temps. Dans le cadre de notre étude, proposer une dizaine de questionnaires pour mesurer la totalité des composants de notre modèle aurait été très voire trop long pour l'utilisateur car cela représenterait plusieurs centaines d'items auquel il aurait à répondre. Notre démarche a plutôt été de proposer un unique questionnaire d'UX (i.e., questionnaire IVEQ) rassemblant des items provenant de dix questionnaires repérés dans la littérature et mesurant la totalité des dix composants de notre modèle.

## 2. Questionnaires référencés mesurant les composants de l'expérience utilisateur

### 2.1 Questionnaire de présence, engagement et immersion

Les trois composants de présence, d'engagement et d'immersion peuvent être mesurés à travers deux questionnaires créés par Witmer and Singer (1998). Ces questionnaires sont une référence dans le domaine de la Réalité Virtuelle. Le questionnaire de présence (PQ : Presence Questionnaire) mesure le degré selon lequel les individus expérimentent le sentiment de présence dans un EVI. Ce questionnaire est composé de 24 items divisés en cinq sous-échelles : implication/contrôle, naturel, auditif, résolution et qualité de l'interface. Les items 4, 6, 10, 13, 20 mesurent, selon nous, le composant d'engagement. Le questionnaire de tendance immersive (ITQ : Immersive Tendency Questionnaire) qui mesure la tendance des individus à se sentir immergés, est composé de 16 items divisés en trois sous-échelles : tendance à s'impliquer, tendance à maintenir son attention et tendance à jouer aux jeux. Les auteurs ont inclus dans ce questionnaire plusieurs items qui mesurent, selon nous, l'engagement de l'utilisateur.

### 2.2 Questionnaire de flow

Le composant de flow peut être mesuré par le questionnaire Flow4D16 créé par Heutte en 2011 et mis à jour en 2015 (Heutte & Fenouillet, 2015). Il est utilisé pour évaluer le degré selon lequel l'utilisateur est absorbé par sa tâche. Ce questionnaire,

qui est inspiré de questionnaires précédents sur le flow : FSS2-36 (Fournier et al., 2007), ECF10 version française du Flow-Kurzskala (Heutte, 2011), DH13 (Déro & Heutte, 2008), consiste en 16 items divisés en quatre sous-échelles : absorption cognitive, perception du temps altéré, absence de préoccupation du soi, bien-être.

### 2.3 Questionnaire de compétences

La compétence peut être mesurée à travers le questionnaire d'auto-évaluation d'efficacité en informatique (CSE : Computer Self-Efficacy) créé par Murphy et al. (1989). Ce questionnaire est une référence dans le domaine de l'éducation pour évaluer les compétences en informatique de l'étudiant adulte. Ce questionnaire aide à comprendre l'attitude de l'utilisateur envers les technologies informatiques, le degré selon lequel il se sent à l'aise avec un ordinateur. Le questionnaire est composé de 32 items avec trois sous-échelles représentant les différents niveaux d'acquisition des compétences informatiques : compétences de débutant, avancées ou compétences sur l'architecture matériel.

### 2.4 Questionnaire d'émotion

Le composant d'émotion peut être mesuré avec le questionnaire d'émotions de réussite (AEQ : Achievement Emotions Questionnaire) créé par Pekrun et al. (2011) et utilisé pour évaluer l'expérience émotionnelle dans les situations de réussite. Les trois sous-échelles représentent trois situations : situation liée à une classe, situation liée à un apprentissage et situation liée à un test. Le questionnaire composé de 232 items repose sur neuf émotions : divertissement, espoir, fierté, soulagement, colère, anxiété, honte, désespoir, ennui. Il propose une grande variété de situations qui peuvent être aisément ajustables à la situation d'un utilisateur dans un EVI. En effet, il ne s'adresse pas à un thème particulier, contrairement aux questionnaires AEQ spécifiques, par exemple, aux Mathématiques - AEQ-M - (Pekrun et al., 2005) ou aux langues - AEQ-L - (Goetz et al., 2006).

### 2.5 Questionnaire d'utilisabilité

Il existe de nombreux questionnaires d'utilisabilité (e.g., Huang & Strawderman, 2013 ; Brinkman et al., 2009 ; Lewis, 1995). Parmi ces outils, l'échelle d'utilisabilité des systèmes (SUS : System Usability Scale) créée par Brooke (1996) sur une base de 50 questionnaires d'utilisabilité, est fréquemment utilisée. Cette échelle composée de 10 items est utilisée pour évaluer l'adéquation d'une utilisation, et permet notamment d'évaluer si l'utilisation de l'EVI est appropriée à une situation.

### 2.6 Questionnaire d'adoption de la technologie

Le composant d'adoption de la technologie peut être mesuré avec le questionnaire unifié d'acceptation et d'utilisation de la technologie (UTAUT : Unified Technology

Acceptance and Use of Technology) créé par Venkatesh (2003), généralement utilisé pour évaluer le degré avec lequel l'utilisateur va adopter et utiliser la technologie (en d'autres termes, la probabilité de succès à l'introduction d'une nouvelle technologie). Ce questionnaire est composé de 31 items divisés en 8 sous-échelles : performance attendue, effort escompté, influence sociale, conditions facilitatrices, attitude d'utilisation de la technologie, efficacité personnelle, anxiété, intention d'utiliser la technologie.

## 2.7 Questionnaire de jugement

Le composant de jugement peut être mesuré avec le questionnaire AttrakDiff 2 créé par Hassenzahl et al. (2003) et classiquement utilisé pour évaluer l'attraction de l'utilisateur envers la technologie à partir de ses perceptions pragmatiques et hédoniques. Ce questionnaire est composé de 28 items divisés en 4 sous-échelles : qualité pragmatique, qualité hédonique-stimulation, qualité hédonique-identification et attractivité.

## 2.8 Questionnaire de conséquence de l'expérience

Le composant de conséquence de l'expérience peut être mesuré à partir des questionnaires sur le mal des simulateurs. Le Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) créé par Kennedy et al. (1993), est utilisé pour évaluer les conséquences négatives que l'utilisateur peut ressentir pendant son utilisation de l'EVI. Ces conséquences négatives sont évaluées à travers 16 items divisés en trois sous-échelles : nausée, problèmes oculomoteurs, désorientation.

## 2.9 Synthèse des Questionnaires

Une synthèse des questionnaires de composants de l'UX est présentée dans le tableau ci-dessous (Tableau 26) qui résume les composants, les questionnaires et leurs sous-échelles.

**Tableau 26. Composants, questionnaires et sous-échelles identifiés pour mesurer l'UX**

<b>Composants</b>	<b>Questionnaires</b>	<b>Sous-échelles</b>
Présence	Presence Questionnaire (PQ)	INV/C (Implication/control)
		NATRL (Naturel)
		AUD (Auditif)
		IFQUAL (Qualité de l'interface)
		RESOL (Résolution)
Engagement	Presence Questionnaire (PQ)	INV/C
Immersion	Immersive Tendency Questionnaire (ITQ)	FOCUS (Tendance à maintenir son attention)
		INVOL (Tendance s'impliquer)
		GAMES (Tendance à jouer aux jeux)
Flow	Flow4D16	Absorption cognitive
		Altération de la perception du temps
		Absence de préoccupation du soi
		Bien-être
Utilisabilité	System Usability Scale (SUS)	N/A
Compétence	Computer self-efficacy Scale (CSE)	Compétences de débutant
		Compétences avancées
		Compétences en unité central
Emotion	Achievement Emotions Questionnaire (AEQ)	Situation liée à une classe
		Situation liée à un apprentissage
		Situation liée à un test
Conséquence de l'expérience	Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)	Nausée
		Oculomoteur
		Désorientation
Jugement	AttrakDiff 2	Qualité pragmatique
		Qualité hédonique-stimulation
		Qualité hedonic-identification
		Attractivité
Adoption de la technologie	Unified Technology Acceptance and Use of Technology (UTAUT)	Performance attendue
		Effort escompté
		Influence sociale
		Conditions facilitantes
		Attitude d'utilisation de la technologie
		Efficacité personnelle
		Anxiété
Intention d'utiliser la technologie		

### 3. Conclusion : construction d'un questionnaire d'expérience utilisateur opérationnalisant le modèle

L'élaboration du questionnaire a consisté à sélectionner un ensemble d'items provenant des questionnaires identifiés dans la section 2 (i.e., PQ<sup>40</sup>, ITQ<sup>41</sup>, Flow4D16 devenu EduFlow2<sup>42</sup>, CSE<sup>43</sup>, AEQ<sup>44</sup>, SUS<sup>45</sup>, UTAUT<sup>46</sup>, AttrakDiff2<sup>47</sup>, SSQ<sup>48</sup>). Nous nous sommes appuyés sur trois critères de sélection d'items :

- Les items choisis ont été traduits dans plusieurs langues dont *a minima* en français ou les items non traduits en français sont faciles à traduire, ils ont des formulations très simples.
- Les items choisis sont suffisamment différents les uns des autres, de manière à ce que l'utilisateur ne les perçoive pas comme redondants.
- Les items choisis ne sont pas ambigus, leur sens est facile à comprendre pour l'utilisateur.

Nous avons finalement choisi trois items par sous-échelle et notre questionnaire final consistait en 87 items (**ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE D'EXPÉRIENCE UTILISATEUR**). Nous y avons ajouté 3 questions ouvertes pour permettre à l'utilisateur d'exprimer ses ressentis positifs et négatifs ainsi que ce qu'il souhaitait améliorer dans l'EVI.

Afin de finaliser le questionnaire, nous avons adapté certains items afin qu'ils correspondent parfaitement au contexte d'un EVI. Ces adaptations consistaient principalement à faire correspondre le terme « Environnement virtuel » au système qui était désigné originalement dans l'item. Le terme « Environnement virtuel » désignait l'EVI dont il était question dans chacun des deux études expérimentales. D'autres adaptations ont dû être réalisées :

- Dans certains questionnaires comme dans le PQ, certaines sous-échelles (e.g., IFQUAL : Qualité de l'interface, NATRL : Naturel, AUD : Auditif, RESOL : Résolution) n'avaient que deux ou trois items ; dans ce cas, tous les items étaient intégrés à notre questionnaire (e.g., AUD : « J'arrivais à identifier correctement les sons produits dans l'environnement virtuel » ; « J'arrivais à localiser correctement les sons produits dans l'environnement virtuel »).
- Dans le questionnaire ITQ, un item provenant de la sous-échelle GAME (i.e., tendance à jouer aux jeux) ne correspondait pas au contexte d'un EVI. D'autres items provenant des sous-échelles INVOL (i.e., tendance à s'impliquer) et FOCUS (i.e., tendance à maintenir son attention), n'étaient pas adaptés. Par conséquent, dans le premier cas, nous avons sélectionné d'autre

---

<sup>40</sup> Presence Questionnaire (Questionnaire de présence)

<sup>41</sup> Immersive Tendencies Questionnaire (Questionnaire de tendances immersive)

<sup>42</sup> *Flow in education (Le flow pour l'éducation)*

<sup>43</sup> Computer Self-Efficacy (mesure efficacité personnel avec les ordinateurs)

<sup>44</sup> Achievement Emotions Questionnaire (Questionnaire d'émotion)

<sup>45</sup> System Usability Scale (Echelle d'utilisabilité pour les systèmes)

<sup>46</sup> Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (Questionnaire de l'acceptation et de l'usage de la technologie)

<sup>47</sup> *Perceived hedonic and pragmatic quality (Questionnaire de qualité hédonique et pragmatique)*

<sup>48</sup> Simulator Sickness Questionnaire (Questionnaire du « mal du simulateur »)

items de la même sous-échelle qui correspondaient davantage. Dans le second cas, nous les avons ajustés à notre contexte et les avons réécrits. Par exemple, l’item « INVOL : À quel point êtes-vous stimulé(e) en ce moment ? » devenait « Je me sentais stimulé(e) dans l’environnement virtuel » ou encore l’item « FOCUS : À quelle fréquence vous identifiez-vous à un personnage d’une histoire » devenait « Je m’identifiais au personnage que je jouais dans l’environnement virtuel ». Ces ajustements proposant des assertions, plutôt que des questions, permettaient d’homogénéiser les formats de réponses (échelles de Likert) pour l’ensemble des questions.

- Dans le questionnaire AEQ, la sous-échelle « situation liée à un test » ne correspondait pas à notre contexte d’EVI. Nous n’avons donc considéré que les deux autres sous-échelles (i.e., situation liée à une classe et situation liée à un apprentissage) en sélectionnant trois items parmi trois catégories d’émotions tiré de Pekrun et al. (2011) : activation positive (i.e., divertissement), activation négative (i.e., anxiété), désactivation négative (i.e., ennui).
- Dans le questionnaire UTAUT, cinq déterminants de la sous-échelle d’intention nous semblaient trop redondants (Efficacité personnelle, anxiété, intention d’utiliser la technologie) ou ne correspondaient pas au contexte (i.e., Performance attendue, influence sociale) nous ne les avons pas pris en compte. Trois sous-échelles correspondaient à notre contexte (i.e., Effort escompté, attitude d’utilisation de la technologie, conditions facilitantes) nous les avons pris en compte tel quel.

**Tableau 27. Items sélectionnés à partir des questionnaires de composants de l’UX originaux et constituant notre propre questionnaire d’UX pour les EVI**

Composants	Questionnaires	Sous-échelles	Items dans les questionnaires originaux
Présence	PQ	INV/C	2, 9, 16
		NATRL	3, 5
		AUD	20, 21
		IFQUAL	17, 18, 19
		RESOL	11, 12
Engagement	PQ	INV/C	4, 10, 13
Immersion	ITQ	FOCUS	3, 7, 18
		INVOL	4, 5, 16
		GAMES	6
Flow	Flow4D16	Absorption cognitive	D1b, D1c, D1d
		Altération de la perception du temps	D2a, D2b, D2c
		Absence de préoccupation du soi	D3b, D3d
		Bien-être	D4a, D4c, D4d

**Tableau 27 (suite). Items sélectionnés à partir des questionnaires de composants de l'UX originaux et constituant notre propre questionnaire d'UX pour les EVI**

<b>Composants</b>	<b>Questionnaires</b>	<b>Sous-échelles</b>	<b>Items dans les questionnaires originaux</b>
Utilisabilité	SUS	N/A	3, 6, 8
Compétence	CSE	Compétences de débutant	15, 21, 23
		Compétences avancées	10, 14, 24
Conséquence de l'expérience	SSQ	Nausée	6, 7, 8
		Oculomoteur	2, 3, 4
		Désorientation	10, 12, 14
Jugement	AttrakDiff 2	Qualité pragmatique	QP3, QP6, QP7
		Qualité hédonique-stimulation	HQS1, HQS5, HQS6
		Qualité hedonic-identification	HQI2, HQI3, HQI7
		Attractivité	ATT2, ATT3, ATT7
Adoption de la technologie	UTAUT	Effort escompté	EOU3, EOU5, EU4
		Attitude d'utilisation de la technologie	A1, AF1, Affect1
		Conditions facilitantes	PBC2, PBC3, PBC5

Enfin, le questionnaire que nous avons proposé comprend 87 items mesurant la présence (12 items), l'engagement (3 items), l'immersion (7 items), le flow (11 items), les compétences (6 items), l'émotion (15 items), l'utilisabilité (3 items), les conséquences de l'expérience (9 items), le jugement (12 items) et l'adoption de la technologie (9 items).



# CHAPITRE V. VALIDATION D'UN QUESTIONNAIRE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de revue internationale : "Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments. *The International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33-48."



## **1. Introduction**

Dans cette étude, nous présentons la validation du questionnaire reposant sur des qualités psychométriques (i.e., fiabilité, sensibilité). Les données brutes recueillies ont été traitées comme provenant d'un seul grand groupe expérimental.

## **2. Validation du questionnaire : étude expérimentale**

### **2.1 Objectif et hypothèses**

L'objectif de cette étude est d'explorer la validité de notre questionnaire élaboré sur la base de la littérature. Les questionnaires de par leur nature subjective induisent deux types de risques : l'incompréhension du sens des items et le risque de donner des réponses stéréotypées. La qualité des scores aux échelles doit donc être analysée à travers des propriétés psychométriques (Fernandez et al., 2005) afin de pallier ces risques. Nous avons suivi une procédure de sélection des échelles et des items qui nous garantisserait un questionnaire pertinent (voir section 3 du 0). Nous faisons donc l'hypothèse selon laquelle notre questionnaire composé de dix sous-échelles est fiable (H1).

Une autre qualité psychométrique caractérisant les questionnaires est la sensibilité. Nous avons observé que la plupart des études évaluent la cohérence interne (i.e., fiabilité) de leur questionnaire mais peu évaluent la sensibilité. Celle-ci renvoie à la notion de distribution. Une très grande majorité de grandeurs physiques se décrit par une distribution normale qui est la plus fréquente dans la nature. Plus la distribution des scores aux échelles d'un questionnaire suit une distribution normale plus les résultats de l'analyse sont généralisables à la population entière. Nous pensons que notre échantillon comporte des distributions normales. Ce qui veut dire que nous nous attendons à ce que la distribution des scores aux échelles suive une distribution symétrique. Les scores aux échelles des dix sous-échelles du questionnaire devraient donc être symétriquement distribués. Nous faisons donc l'hypothèse que notre questionnaire est sensible (H2).

### **2.2 Participants**

152 participants (28 femmes et 124 hommes) qui se sont portés volontaires ont été impliqués dans cette étude. Un questionnaire d'identification permettait de recueillir des informations telles que le diplôme en préparation ou la profession des participants. L'analyse du questionnaire indiquait que 122 participants travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., RV, réseaux, web, design graphique, multimédia et internet, ...). Les autres participants travaillaient ou étudiaient dans divers autres domaines (e.g., éducation, marketing, restauration, relation publique, banque, ...). Les participants avaient en moyenne 23,96 ans (ET = 6,93 ; Min = 18 ; Max = 63).

Pour le recrutement, un mail présentant le contexte et l'objectif global de l'expérience a été envoyé à plusieurs listes de diffusion d'établissements universitaires (e.g., IUT, Master MTI3D, etc.) et de formation (e.g., AFPA, EON Entrepreneur school, etc.). Des affiches (**ANNEXE 2 : AFFICHE DE RECRUTEMENT**) ont également été établies présentant les mêmes informations que dans les mails et ont été affichées autour du lieu de l'expérimentation.

## 2.3 Procédure

Les participants débutaient en complétant un questionnaire d'identification (**ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE D'IDENTIFICATION**). Puis, l'expérimentateur leur introduisait l'expérimentation et leur donnait des instructions. Ils s'asseyaient (Figure 16) et étaient confrontés à l'EVI durant deux ou trois sessions suivant l'expérimentation (cf. sections 2 à 6 du CHAPITRE VI). La première consistait en une session d'entraînement guidée oralement qui durait environ 5 minutes. Les participants pouvaient demander un temps d'entraînement plus ou moins long selon leur niveau d'aisance avec l'EVI. Lors de la session d'entraînement, trois sphères alignées les unes à côtés des autres étaient présentées aux participants dans l'EVI. Elles représentaient des cibles sur lesquels les participants pouvaient tirer avec des projectiles sous forme de balles. Après avoir collecté les balles éparpillées sur le terrain dans l'EVI, ils pouvaient gagner un point s'ils tiraient correctement une balle de feu sur la sphère bleue, une balle de glace sur la sphère rouge ou une balle d'éclair sur la sphère verte. La session d'entraînement prenait fin lorsque l'environnement virtuel disparaissait et laissait place à un écran noir ce qui indiquait que les 5 minutes d'entraînement s'étaient écoulées.

Les seconde et troisième sessions étaient deux sessions effectives de jeu qui duraient 5 minutes chacune. Pour ces sessions, les participants devaient suivre des instructions dans un pseudo-langage de programmation affichées sur un panneau virtuel dans l'EVI. Les tâches à réaliser couvraient différents aspects d'une activité de chasse tels que le déplacement, le tir de projectile, une recherche active des cibles dans tout l'environnement. A la fin de la deuxième et de la troisième sessions, les participants devaient compléter le questionnaire de l'UX IVEQ. Les participants étaient ensuite remerciés pour leur participation et des objets (e.g., sac en toile, écharpe, magnet, tasse) leur étaient offerts. Chaque participant passait entre 45 minutes et 1 heure dans la salle d'expérimentation.

Cette expérimentation a également servi à la validation du modèle IVEM, comme nous l'avons détaillé dans le CHAPITRE I. Ainsi les sessions 2 et 3 nous servaient à faire varier la valence des facteurs d'influence. Dans le cadre de la validation du questionnaire rapportée ici, nous n'avons pris en compte, pour chaque participant, que la session avec la valence optimale des facteurs d'influence, et donc que le questionnaire IVEQ complété pour cette session.



**Figure 16. Salle d'expérimentation**

#### 2.4 Tâches réalisées

Lors des sessions effectives de jeu, les participants devaient trouver des projectiles (3 types de projectile différents : balle de feu, balle de glace et balle d'éclair) et les tirer sur les ennemis (2 types d'ennemis différents : créature de feu et créature de glace) en respectant les consignes qui demandaient d'associer un type de projectile à un type d'ennemi pour 2 des projectiles, le dernier projectile (i.e., balle d'éclair) pouvant être tiré sur les 2 ennemis. Ils pouvaient gagner un point s'ils tiraient correctement une balle de glace sur la créature de feu ou une balle de feu sur la créature de glace. S'ils tiraient une balle d'éclair sur les deux types de créatures, ces dernières s'immobilisaient indéfiniment. Les participants pouvaient évoluer dans six niveaux de jeu. Ils passaient d'un niveau à l'autre après avoir éliminé toutes les créatures vivantes du niveau en cours. Durant le premier niveau, ils ne pouvaient tirer que des balles de glace et seules les créatures de feu les poursuivaient (Figure 17). Dans le deuxième niveau, la quantité de créatures augmentait. Dans le troisième niveau, les participants pouvaient tirer des balles de glace et d'éclair.



**Figure 17. Capture d'écran de l'EVI Think And Shoot**

Dans les quatrième et cinquième niveaux, la quantité de créatures augmentait encore, ils pouvaient tirer tous les types de balle (i.e., feu, glace, éclair) et les deux types de créature de feu et de glace les poursuivaient.

## 2.5 Matériels et mesure

### 2.5.1 L'Environnement Virtuel Immersif

#### Application d'environnement virtuel immersif Think And Shoot

Une application d'EVI a été développée pour la première étude (Figure 18). Nous avons fait le choix de concevoir notre propre EVI, car en tant qu'expérimentateur, nous pouvions paramétrer les caractéristiques de l'environnement virtuel (i.e., largeur du champ visuel, fréquence d'image, feedback du contenu 3D, niveau d'interactivité) pour voir en quoi ceux-ci affectent l'UX de l'application.

Cet EVI permettait de familiariser les participants avec les notions de « fonction »<sup>50</sup> et « paramètres »<sup>51</sup> tout au long des 6 niveaux. Les niveaux augmentent en difficulté de manière graduelle (i.e., plus le niveau augmente, plus il y a de créatures à éliminer et de balles différentes à gérer). Le choix d'apprentissage de ces notions (i.e., fonction, paramètre) nous semblait simple à programmer sans mobiliser des compétences que nous ne maîtrisions pas. Cette application propose au participant d'évoluer dans un EVI ludique qui s'accompagne d'un certain raisonnement logique.



**Figure 18. Capture d'écran de l'environnement virtuel immersive "Think and Shoot" au premier niveau avec le panneau d'instruction, le plan réduit et une créature de feu**

<sup>50</sup> Ensemble d'instructions constituant un sous-programme identifié par un nom, ayant la capacité d'effectuer un calcul ou une tâche indépendamment du programme principal.

<sup>51</sup> Variable (en entrée) qui peut prendre des valeurs différentes et qui peut être reçue par une fonction et changer le comportement de celle-ci à son exécution.

L'EVI ludo-éducative "Think and Shoot" fonctionne sur un ordinateur Dell de 64bits avec 4GB de RAM, un processeur Intel® Xeon® E5-1603 de 2.80GHz. Une manette sans fils Logitech®, un clavier Dell® et un casque Oculus© kit de développement 2 (DK2) permet aux participants de récolter et de tirer les balles sur les cibles. Du son spatialisé était diffusé dans le casque audio Tritton® AX 180.

Les valeurs de largeur du champ visuel (i.e., 32° ou 106°) ont été configurées dans l'EVI pour cette expérimentation. Ces valeurs ont été choisies car elles représentent de manière pertinente les facteurs influençant l'EVI selon la littérature scientifique. Typiquement, la largeur de champ visuel de 32° a été choisie comme valeur minimale acceptable permettant aux participants d'interagir dans l'EVI (Hassan et al., 2007) et la valeur de 106° est le champ de vision le plus large possible dans le casque Oculus DK2 et donc le plus agréable à l'utilisateur.

## Développement de l'environnement virtuel immersif ludique à composante éducative Think And Shoot

L'EVI a été développé par nos soins avec l'environnement de développement Unity3D ©. Ce dernier, spécifique au développement d'environnements virtuels, permet de créer des objets virtuels et de leur attribuer un comportement grâce à un script associé, codé dans le langage de programmation orienté objet C#. Cet EVI comporte une étape de paramétrage destiné à l'expérimentateur et une étape de jeu destiné au participant. Cinq objets principaux interagissent dans l'EVI. Leurs comportements sont décrits ci-dessous.

- L'objet **Joueur** : il peut récolter des balles lorsqu'il entre en collision avec elles. Il peut ensuite les tirer dans le but d'éliminer une créature. Lorsqu'il atteint une créature avec une balle et que celle-ci est éliminée, son score est incrémenté d'un point. Par contre lorsqu'il entre en collision avec une créature, son score est décrémenté d'un point. Lorsque son score atteint zéro il recommence le niveau dans lequel il est.
- L'objet **Balle** : trois types d'objet balle existent, un type balleFeu, un autre de type balleGlace et un troisième de type balleEclair. À chaque niveau, plusieurs objets Balle de chaque catégorie sont créés et dispersés dans l'environnement sauf dans le premier niveau où seul l'objet de type balleGlace est créé, dans le deuxième niveau, ce sont les objets de type balleGlace et balleEclair qui sont créés. Lorsque le joueur récolte une balle d'un certain type, celle-ci est éliminée dans l'environnement et son stock est incrémenté ; lorsqu'il en tire une, son stock est décrémenté. Au bout d'un temps fixe (30 secondes), la balle est de nouveau créée dans l'environnement.
- L'objet **Créature** : deux types d'objet créature existent, un type créatureFeu et un type créatureGlace. À chaque niveau, plusieurs objets Créature de chaque catégorie sont créés sauf dans les deux premiers niveaux où seul l'objet de type créatureFeu est créé. Les créatures suivent automatiquement le joueur. Une

créature peut être impactée par une balle, mais elle n'est éliminée qu'à l'impact de la « bonne » balle. Par exemple, une créatureFeu n'est éliminée que si une balleGlace l'atteint et une créatureGlace est éliminée uniquement si une balleFeu l'atteint. Autrement, il ne se passe rien et le jeu poursuit son cours dans le même état. Par contre, ces deux types de créature sont immobilisés pour une durée infinie lorsqu'une balle de type balleEclair les atteint.

- L'objet **Panneau** : il affiche au premier plan les nouvelles règles de chacun des six niveaux ainsi que le score et le stock de balle mis à jour du joueur.
- L'objet **Plan Réduit** : il affiche au premier plan, une copie réduite de l'environnement vue de haut avec la position du joueur et les positions des balles gravitant autour du joueur.
- L'objet **Environnement** : il crée les objets Balle, Créature, Joueur, Panneau et les positionne dans l'environnement. Il délimite également la zone dans laquelle les créatures peuvent se déplacer automatiquement. Il initialise dans le jeu les paramètres renseignés dans l'étape paramétrage. Il lance le premier niveau au démarrage, le niveau suivant lorsque toutes les créatures sont éliminées de l'environnement et réinitialise le même niveau lorsque le score du joueur est à zéro.

## Logique du jeu Think And Shoot

L'application comporte une composante ludique et une composante logique de pseudo langage de programmation. Cette dernière propose à l'utilisateur des instructions à respecter pour gagner des points. Ces instructions sont affichées au premier plan dans le panneau de l'environnement du jeu. Une instruction est composée d'une fonction et de plusieurs paramètres. Un seul type de fonction existe, il s'agit de : « Tirer », qui indique au joueur qu'il peut tirer un projectile sur une cible. Trois paramètres sont inclus dans cette fonction, le premier correspond à une cible (e.g., créatureFeu ou créatureGlace), le deuxième correspond à un projectile (e.g., balleFeu, balleGlace, balleEclair) et le troisième correspond au stock de balles (e.g., 0, 1, 2, 6, ...). Par exemple, l'instruction *Tirer (créatureFeu, balleGlace, 0)* voudrait dire qu'il n'y a plus de balle de glace pour tirer sur la créature de feu et l'instruction *Tirer (créatureGlace, balleFeu, 6)* voudrait dire que le joueur dispose de 6 balles de feu pour tirer sur les créatures de glace.

### 2.5.2 Questionnaire d'identification

Un document de consentement (**ANNEXE 1 : DOCUMENT DE DROIT À L'IMAGE**) a été utilisé pour introduire aux participants l'activité du laboratoire et pour recueillir leur autorisation de participation à notre étude sous les conditions énoncées (e.g., expérience filmée, confidentialité demandée, etc.). Les participants renseignaient également leurs données personnelles (i.e., nom, prénom, date de naissance, adresse) sur le document. Ils remplissaient ensuite un questionnaire d'identification (**ANNEXE**

**3 : QUESTIONNAIRE D'IDENTIFICATION)** avec leur profession ou diplôme en préparation, leur niveau d'aisance en programmation ainsi que leur fréquence d'usage des technologies et logiciels 3D.

Etant donné l'objectif de notre application, trois items avec une échelle de Likert à cinq points étaient dédiés au niveau d'aisance en programmation (0 = Aucune connaissances, 4 = Excellentes connaissances). Deux questions à choix multiple étaient dédiées à l'identification d'une fonction puis des paramètres d'une fonction dans une ligne de code. Le résultat était codé avec un point si le participant donnait une bonne réponse et avec zéro point s'il ne donnait pas de bonne réponse. Trois autres questions à choix multiple étaient dédiées la fréquence d'usage des technologies 3D (0 = Jamais, 1 = Parfois, 2 = Souvent, 3 = Très souvent). La première question concernait la fréquence d'usage des technologies pouvant être associés à des interactions 3D telles que les casques de RV, manette de jeu, joystick, Kinect, Leap Motion etc. La seconde question matrice concernait la fréquence d'usage des jeux ou logiciels 3D telles que Virtools, Unity3D, 3DSMax, Maya, AutoCAD, etc.

### 2.5.3 Questionnaire d'UX IVEQ

Les scores aux échelles de l'UX des participants ont été collectés à travers le questionnaire d'UX IVEQ de 87 items (ANNEXE 6: QUESTIONNAIRE D'EXPERIENCE UTILISATEUR) dont la conception et la validation sont détaillées dans les chapitres IV et V. 12 items mesurent la présence (e.g., « *1. Mes interactions avec l'environnement virtuel me semblaient naturelles* »). 3 items mesurent l'engagement (e.g., « *J'étais impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel* »). 7 items mesurent l'immersion (e.g., « *Je me sentais stimulé(e) par l'environnement virtuel* »). 11 items mesurent le flow (e.g., « *Je sentais que je contrôlais parfaitement mes actions* »). 3 items mesurent l'utilisabilité (e.g., « *34. J'ai trouvé les périphériques d'interactions (casque, manette et/ou clavier) faciles à utiliser* »). 15 items mesurent l'émotion (e.g., « *J'ai apprécié être dans cet environnement virtuel* »). 6 items mesurent les compétences (e.g., « *J'étais sûr(e) de moi lorsque je sélectionnais des objets dans l'environnement virtuel* »). 12 items mesurent le jugement (e.g., « *Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est Pas pratique/ Pratique* »). 9 items mesurent les conséquences de l'expérience (e.g., « *Je me suis senti(e) fatigué(e) durant mon interaction avec l'environnement virtuel* ») et 9 items mesurent l'adoption de la technologie (e.g., « *Si j'utilise de nouveau le même environnement virtuel, mon interaction avec l'environnement sera claire et compréhensible pour moi* »).

75 items ont une échelle de Likert à dix points (1 = Pas du tout d'accord, 10 = Tout à fait d'accord). 12 items ont une échelle sémantique différentielle : le point 1 identifie un adjectif à connotation négative (e.g., pas pratique, confus, incontrôlable, etc.) et le point 10 identifie un adjectif à connotation positive (e.g., pratique, clair, maîtrisable, etc.). Le temps de complétion du questionnaire variait entre 15 et 20 minutes.

## 2.6 Données collectées et analyse : validation du questionnaire d'UX IVEQ

### 2.6.1 Propriétés psychométriques

Compte tenu de la taille de notre échantillon (i.e.  $N= 152$ ), nous remplissons les conditions pour évaluer la fiabilité et la sensibilité de notre questionnaire d'UX. La fiabilité est l'évaluation de la stabilité d'une mesure (Bernaud, 2014). Une mesure fortement cohérente reproduit les mêmes résultats sous les mêmes conditions. Il y a plusieurs catégories de fiabilité, par exemple le test-retest, évalué en observant la stabilité des résultats au cours du temps, la cohérence interne des sous-échelles, évaluée à travers le calcul du coefficient de l'alpha de Cronbach ou l'analyse d'item, évaluée à travers le calcul du coefficient de corrélation de Pearson. La sensibilité évalue l'habileté d'une méthode de mesure à détecter les différences parmi les individus (Guillevic & Vautier, 1998). La sensibilité peut être intra individuelle ou inter individuelle. En revanche, nous ne remplissons pas les conditions pour évaluer la validité de notre questionnaire *via* des analyses factorielles, discriminante ou de construits. En effet, nous avons observé que pour augmenter leur efficacité, de telles analyses demandaient une plus grande taille d'échantillon (e.g.,  $N= 300$ , Tabachnik & Fidell, 2007 ;  $N = 200$ , Anderson & Gerbing, 1984). Or comme nous l'avons mentionné dans le CHAPITRE I, nous savions les difficultés que nous aurions pour recruter un tel échantillon. Nous avons donc fait le choix de limiter nos analyses psychométriques à la fiabilité et à la sensibilité.

### 2.6.2 Fiabilité

Une analyse de la cohérence interne des sous-échelles (e.g., présence, immersion, flow, émotion, etc.) a été réalisée avec le calcul du coefficient de l'alpha de Cronbach. Les données de la totalité des participants ont été prises en compte. Cela permet de modifier le questionnaire en ajustant ou en éliminant les sous-échelles non cohérentes (i.e.,  $\alpha < 0,7$ ).

Une analyse de la cohérence interne des items a également été réalisé avec le calcul du Coefficient de Corrélation de Pearson (CCP) pour chacun d'eux. Les données de la totalité des participants ont été prises en compte. Cela permet de modifier le questionnaire en éliminant les items non cohérents (i.e.,  $CCP < 0,3$ ).

### 2.6.3 Sensibilité

Afin de déterminer la sensibilité interindividuelle pour chaque sous-échelle, nous avons calculé la distribution des scores aux échelles de notre échantillon et l'avons comparé à la distribution normale de Gauss. Une observation qualitative et le test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) nous permet de déterminer si les scores aux échelles de notre échantillon sont normalement distribués.

## 2.7 Résultats : validation du questionnaire d'UX IVEQ

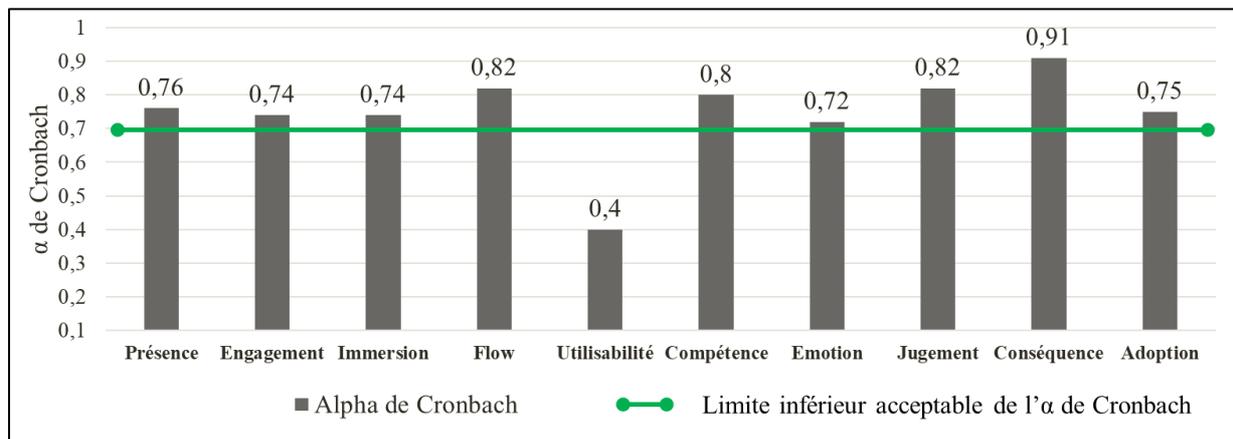
Nous présentons ci-dessous les résultats des alphas de Cronbach et des CCP déterminant la cohérence interne de notre questionnaire. De plus, nous présentons les graphiques de distribution des scores aux échelles et l'analyse du test K-S qui déterminent la sensibilité interindividuelle de notre questionnaire. Ces propriétés psychométriques ont été calculées avec le logiciel de statistiques IBM® SPSS®.

### 2.7.1 Fiabilité

#### Cohérence interne : fiabilité des sous-échelles

Les données de la cohérence interne des sous-échelles ( $\alpha$  de Cronbach) sont présentées dans la Figure 19 et le Tableau 28. Ces données indiquent - pour les sous-échelles de présence, engagement, immersion, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, et adoption de la technologie - une cohérence interne satisfaisante ( $\alpha > 0,7$  ; i.e.,  $\alpha$  entre 0,723 et 0,908). Afin d'obtenir ces résultats, un item a été éliminé dans la sous-échelle de présence.

En revanche, pour la sous-échelle d'utilisabilité, les données indiquent une cohérence interne insatisfaisante ( $\alpha < 0,7$  ; i.e.,  $\alpha = 0,398$ ). Les trois items de cette sous-échelle ont été éliminés. Au total, 4 items ont été éliminés grâce à cette analyse pour améliorer la cohérence interne de notre questionnaire. Ils ne sont donc pas pris en compte dans le reste de l'étude.



**Figure 19. Valeur du coefficient de l'alpha de Cronbach pour les 10 sous-échelles du questionnaire IVEQ**

**Tableau 28. Résultats de l'alpha de Cronbach pour les sous-échelles du questionnaire IVEQ**

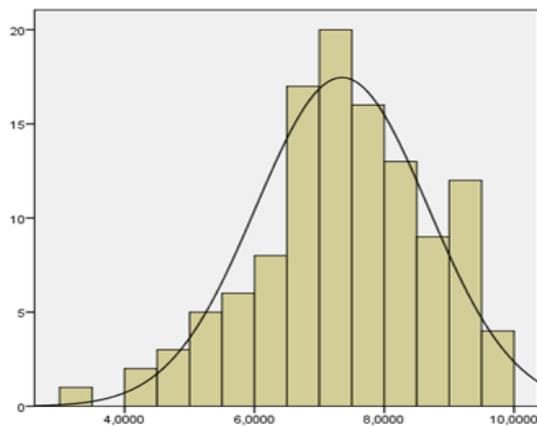
Sous-échelle	$\alpha$ de Cronbach	Nombre d'items avant analyse	Sources	Items éliminés
Présence	0,763	11		1
Engagement	0,739	3	(Witmer & Singer, 1998)	.
Immersion	0,737	7		.
Flow	0,818	11	(Heutte & Fenouillet, 2015)	.
Utilisabilité	0,398	3	(Brooke, 1996)	34 ; 35 ; 36
Compétence	0,798	6	(Murphy, Coover, & Owen, 1989)	.
Emotion	0,723	15	(Pekrun, Goetz, Frenzel, Barchfeld, & Perry, Measuring emotions in students' learning and performance: The Achievement Emotions Questionnaire (AEQ), 2011)	.
Conséquence de l'expérience	0,908	9	(Kennedy , Lane, Berbaum, & Lilienthal, 1993)	.
Jugement	0,823	12	(Hassenzahl, Burmester, & Koller, 2003)	.
Adoption de la technologie	0,753	9	(Venkatesh, Morris, Davis, & Davis, 2003)	.

### Cohérence interne : fiabilité des items

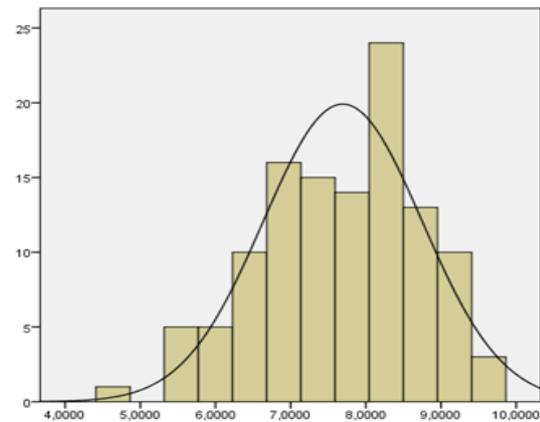
Les résultats de l'analyse des items du questionnaire IVEQ (ANNEXE 5 : COEFFICIENT DE CORRÉLATION DE PEARSON DES 83 ITEMS DU QUESTIONNAIRE IVEQ) indiquent un CCP satisfaisant pour 68 items sur 87. Ces items sont donc corrélés de manière significative (modérément à fortement corrélé) avec le score global des items du questionnaire. Plus particulièrement, 9 items sur 11 provenant de la sous-échelle de présence, les 3 items de celle d'engagement, 5 items sur 7 provenant de la sous-échelle d'immersion, 10 items sur 11 provenant de celle de flow, 11 items sur 15 provenant de la sous-échelle d'émotion, les 6 items de celle de compétence, 9 items sur 12 provenant de la sous-échelle de jugement, 8 items sur 9 provenant de celle des conséquence de l'expérience et 7 items sur 9 provenant de celle de l'adoption des technologies sont corrélés de manière significative. 15 items sur 87 ne sont donc pas corrélés avec le score global des items du questionnaire. Ces 15 items ont été éliminés grâce à cette analyse pour améliorer la cohérence interne de notre questionnaire. Ces items ne sont donc pas pris en compte dans le reste de l'étude.

## 2.7.2 Sensibilité

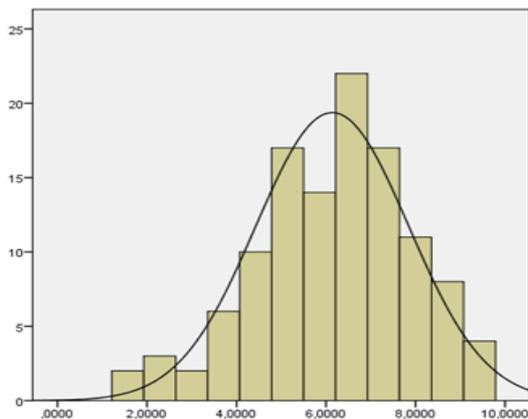
L'analyse de la sensibilité de notre questionnaire est présentée dans les figures ci-dessous. Les données indiquent que les scores des sous-échelles de flow (Figure 20), de présence (Figure 21), d'immersion (Figure 22), d'engagement (Figure 23), d'émotion (Figure 25), et de jugement (Figure 26) présentent une distribution approximativement symétrique par rapport à la distribution normale. Tandis que les scores des sous-échelles de compétence (Figure 24), d'adoption de la technologie (Figure 27) et de conséquences de l'expérience (Figure 28) présentent une distribution décalée vers la droite par rapport à la distribution normale.



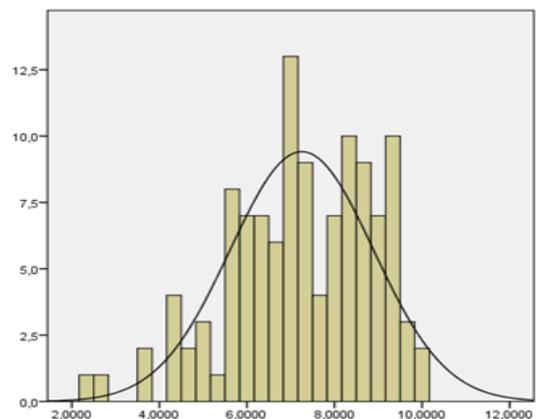
**Figure 20. Distribution des scores du flow**



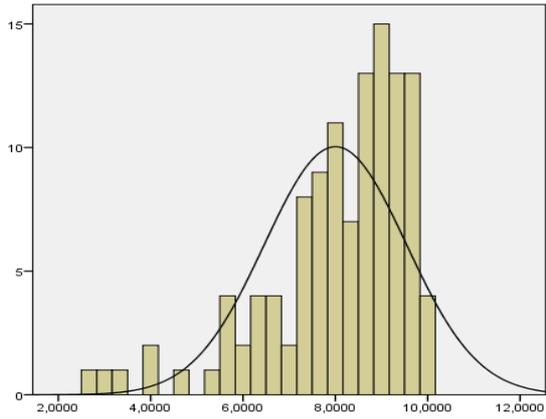
**Figure 21. Distribution des scores de la présence**



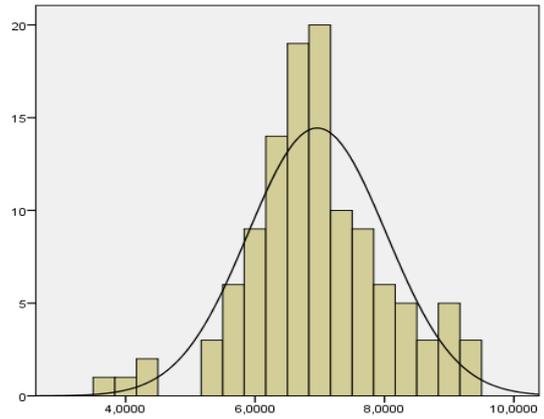
**Figure 22. Distribution des scores de l'immersion**



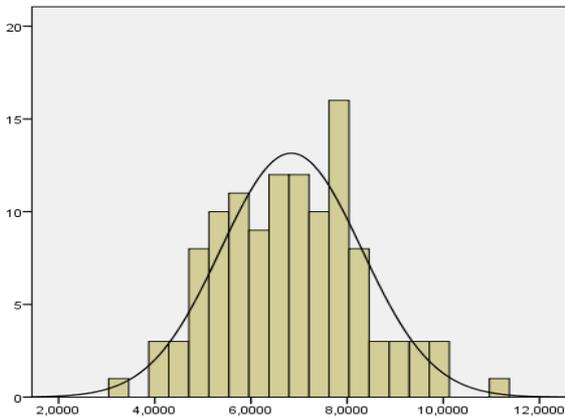
**Figure 23. Distribution des scores de l'engagement**



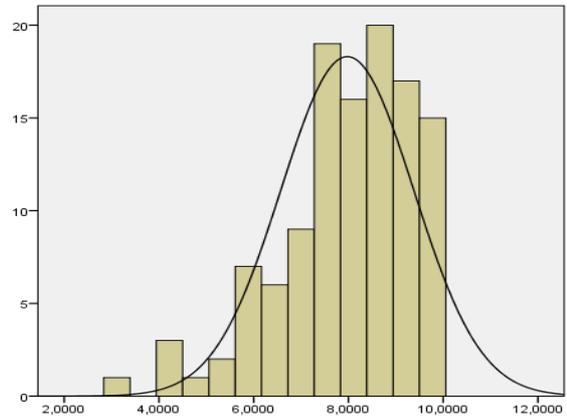
**Figure 24. Distribution des scores de compétence**



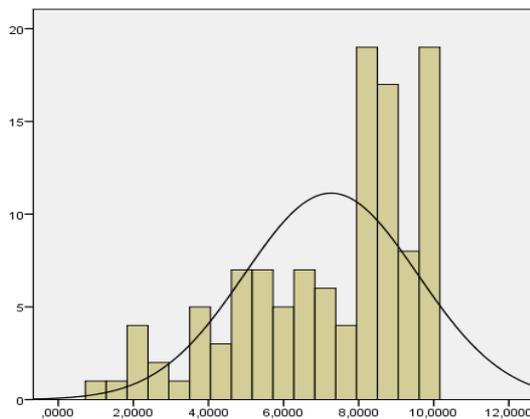
**Figure 25. Distribution des scores d'émotion**



**Figure 26. Distribution des scores du Jugement**



**Figure 27. Distribution des scores de l'adoption de la technologie**



**Figure 28. Distribution des scores des conséquences de l'expérience**

L'observation des distributions approximativement symétriques des 6 sous-échelles (i.e., flow = -0,472 ; présence = -0,353 ; engagement = -0,570 ; immersion = -0,368 ; émotion = -0,062 ; jugement = 0,208) et distributions asymétriques des 3 sous-échelles (i.e., compétence = -1,390 ; adoption de la technologie = -0,925 ; conséquence de l'expérience = -0,822) sont confirmées par les valeurs d'asymétrie présentées dans le Tableau 29.

**Tableau 29. Moyenne, écart type, variance, valeur d'asymétrie, coefficient du test**

Sous-échelles	Moyenne	Ecart Type	Variance	Asymétrie	Kolmogorov -Smirnov Z	p
Présence	7,692790	1,0565509	1,116	-0,353	0,839	0,483
Engagement	7,252874	1,6386755	2,685	-0,570	1,062	0,209
Immersion	6,139163	1,7060320	2,911	-0,368	0,740	0,644
Flow	7,349373	1,3249692	1,756	-0,472	0,608	0,853
Compétence	8,001437	1,5372187	2,363	-1,390	1,393	0,041
Emotion	6,959770	1,0680744	1,141	-0,062	1,084	0,190
Conséquence de l'expérience	7,265326	2,3089256	5,331	-0,822	1,809	0,003
Jugement	6,838362	1,4659290	2,149	0,208	0,491	0,969
Adoption de la technologie	7,975096	1,4040878	1,971	-0,925	1,014	0,256

**de Kolmogorov-Smirnov et p des scores des sous-échelles du questionnaire IVEQ**

### 2.7.3 Questionnaire IVEQ validé

L'analyse de ces données de fiabilité et de sensibilité nous permet d'aboutir à un questionnaire d'UX modifié. Au total, 19 items sur 87 ont été éliminés du questionnaire original. Le questionnaire d'UX IVEQ est dorénavant composé de 68 items et 3 questions ouvertes. 9 items composent la sous-échelle de présence, 3 items composent celle de l'engagement, 5 items composent la sous-échelle d'immersion, 10 items composent celle de flow, 11 items celle de l'émotion, 6 items composent la sous-échelle de compétence, 9 items composent celle de jugement, 8 items composent celle des conséquences de l'expérience et 7 items composent la sous-échelle de l'adoption de la technologie (**ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE D'EXPÉRIENCE UTILISATEUR**).

## 3. Discussion de l'étude

Pour répondre au deuxième objectif de ces travaux qui était de concevoir et de valider le questionnaire d'UX IVEQ, nous avons tout d'abord construit un questionnaire d'UX à partir d'échelles existantes provenant de la littérature scientifique. Nous avons

ensuite étudié la fiabilité (i.e., cohérence interne) des dix sous-échelles et des 87 items retenus pour le questionnaire. Nous avons ensuite étudié la sensibilité de notre questionnaire. Afin de montrer l'intérêt de nos résultats, nous discutons ci-après nos hypothèses.

La première hypothèse de cette étude qui suggérait que les dix sous-échelles de notre questionnaire étaient fiables est partiellement validée. En plus de 68 items (CCP = 0,301 à 0,737), les neuf sous-échelles suivantes ( $\alpha = 0,723$  à  $0,908$ ) sont fiables : la présence ( $\alpha = 0,763$ ), l'immersion ( $\alpha = 0,737$ ), l'engagement ( $\alpha = 0,739$ ), le flow ( $\alpha = 0,818$ ), l'émotion ( $\alpha = 0,723$ ), les compétences ( $\alpha = 0,798$ ), le jugement ( $\alpha = 0,823$ ), les conséquences de l'expérience ( $\alpha = 0,908$ ) et l'adoption de la technologie ( $\alpha = 0,753$ ). La sous-échelle d'utilisabilité a été, quant à elle, rejetée ( $\alpha = 0,398$ ). Cette sous-échelle incohérente peut être expliquée par plusieurs raisons : premièrement, la formulation des items pourrait ne pas avoir été suffisamment spécifique au contexte mais trop générique, ce qui aurait rendu ces items interprétables de différentes façons ; deuxièmement, les items pourraient avoir été redondants, cela aurait pu perturber l'utilisateur dans la mesure où il pourrait avoir eu l'impression de répondre à plusieurs reprises à la même question.

D'autres études ont également évalué la cohérence interne des échelles originales qui ont servi de base à notre questionnaire. Witmer et Singer (1998) ont évalué celle de la présence ( $\alpha = 0,88$ ), de l'immersion ( $\alpha = 0,81$ ) et de l'engagement ( $\alpha = 0,88$ ), Heutte et Fenouillet (2015) ont évalué celle du flow ( $\alpha = 0,84-0,86$ ), Pekrun et al. (2011) ont évalué celle de l'émotion ( $\alpha = 0,78-0,93$ ), Murphy et al. (1989) ont évalué celle des compétences ( $\alpha = 0,95$ ), Venkatesh et al. (2003) ont évalué celle de l'adoption de la technologie ( $\alpha = 0,753$ ), Lewis et Sauro (2009) ont évalué celle de l'utilisabilité ( $\alpha = 0,92$ ), Hassenzahl et al. (2003) ont évalué celle du jugement ( $\alpha = 0,73-0,90$ ), Kennedy et al. (1993) ont évalué celle des conséquences de l'expérience ( $\alpha = 0,71$ ).

La deuxième hypothèse de cette étude qui supposait que les scores aux échelles des dix sous-échelles du questionnaire étaient symétriquement distribués est également partiellement validée. Nous avons observé que la majorité des scores, ceux de six des sous-échelles, étaient normalement distribués (i.e., présence, engagement, immersion, flow, émotion, jugement), tandis que les scores de trois sous-échelles étaient asymétriquement distribués, décalés vers la droite. Cette asymétrie peut être expliquée par le nombre élevé d'individus jeunes de même profil ( $M = 23,96$  ans, étudiants, attiré par les nouvelles technologies du virtuel) qui ne représente qu'une catégorie de la population.

#### **4. Limites de l'étude**

Bien qu'ayant obtenu des résultats encourageants de la validation de notre questionnaire IVEQ en termes de fiabilité et de sensibilité, l'une des limites les plus significatives est la taille de notre échantillon ( $N = 152$ ). Une taille d'échantillon plus élevée nous aurait permis d'explorer d'autres propriétés psychométriques de validité de notre questionnaire *via* des analyses factorielles, de validité discriminante ou de validité des construits, souvent associées à la validation de questionnaires. En effet,

nous avons observé que pour augmenter leur efficacité, de telles analyses demandaient une plus grande taille d'échantillon (e.g., N= 300, Tabachnik & Fidell, 2007 ; N = 200, Anderson & Gerbing, 1984) ou un nombre proportionnel de participants par rapport aux items (e.g. 10 participants pour un item, Nunnally, 1978). D'après plusieurs études sur ce type d'analyses (i.e., MacCallum et al., 1999 ; Comrey & Lee, 1992), la taille de l'échantillon affecte les résultats de l'analyse, puisque plus N augmente, plus l'erreur d'échantillonnage est réduite, et plus l'analyse est stable et représente véritablement la réelle structure de la population.

Une deuxième limite concerne le manque de validation de la répétabilité de nos données à travers, par exemple, la méthode de test-retest (i.e., répétition dans les mêmes conditions), de la sensibilité intra-individuelle (i.e., répétition avec des groupes indépendants) ou de l'analyse de critère (i.e., répétition avec les questionnaires d'origine). Nous n'avons pas pu répéter les résultats de cette étude, en effet, compte tenu du fait que de nombreux participants de cette étude étaient des étudiants issus de différentes formations, il était matériellement impossible de les convoquer à nouveau en raison de leur mobilité (stages, semestres à l'étranger, etc.). De plus, le temps d'expérimentation requis dans cette étude est un facteur limitant puisqu'une expérimentation de réalité virtuelle telle que la nôtre est longue à mettre en place et à réaliser. Par ailleurs, passer plusieurs fois la même expérimentation, d'une durée moyenne de 45 minutes, sur une période de plusieurs semaines favoriserait le risque de réponses aléatoires au questionnaire de 87 items par les participants. Les données alors recueillies n'auraient probablement pas été pertinentes.

## **5. Conclusion et perspective**

L'objectif de cette étude était de valider un outil de mesure (IVEQ) opérationnalisant le modèle IVEM proposés sur la base de la littérature scientifique. Les données de l'UX subjective ont été recueillies à travers le questionnaire IVEQ. Plus précisément, cette étude met en évidence un processus méthodologique détaillé de validation qui débute par la mesure de la fiabilité puis de la sensibilité de notre questionnaire IVEQ. Pour la fiabilité, la cohérence interne des sous-échelles (alpha de Cronbach) et des items (coefficient de corrélation de Pearson) ont permis d'affiner le questionnaire en éliminant 19 items. Pour la sensibilité, la distribution normale des scores de 6 sous-échelles a été confirmée et la distribution asymétrique des scores de 3 sous-échelles permettent de mettre en avant la spécificité « EVI compatible » de notre échantillon.

L'utilisation de notre modèle dans différentes études de différents domaines avec différents dispositifs immersifs de RV contribuerait à affiner et à stabiliser, dans un premier temps, le questionnaire d'UX IVEQ en éliminant les items et sous-échelles les moins adaptés.

Toutefois, nous avons vu que ce protocole expérimental contenait des limites énoncées précédemment (voir section 4). Afin d'obtenir un taux de participants plus important (e.g., > 300), le protocole expérimental pourrait être conduit en ligne *via* des outils tel que le « webvr » (voir la page webvr.info). Ce type d'outil permet à

l'utilisateur d'avoir des expériences de RV immersive ou non directement dans son navigateur affiché sur n'importe quel type de dispositif de RV. Les expériences en ligne mobilisent généralement davantage de participants que les expériences *in situ* ou en laboratoire. Par conséquent, envisager ce type de protocole en ligne pourrait également nous permettre d'évaluer plus aisément la stabilité de nos résultats ou de les étendre en répétant l'expérience avec un plus grand nombre de participants en ligne ou en testant différents groupes de la population auxquels nous aurions plus facilement accès. Ce protocole ne comporte pas que des avantages, un inconvénient lié aux outils en ligne, concerne l'incertitude de l'investissement réel des participants, du fait qu'aucun évaluateur n'est présent pour les contrôler en temps réel (i.e., quelle tâche réalise le participant, comment il la réalise, si c'est bien le participant sélectionné qui la réalise, si il réalise la tâche en une fois ou si il fait des pauses sans respecter le temps imparti, etc.). Un autre inconvénient, qui peut être crucial dans le cadre d'un EVI, est la variabilité du matériel et de la connexion à internet, qui peut être de nature à fortement impacter l'UX.

## CHAPITRE VI. VALIDATION D'UN MODELE DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de revue internationale : "Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O. & Richir, S. (2017). Effects of Interaction Level, Framerate, Field of View, 3D Content Feedback, Previous Experience on Subjective User eXperience and Objective Usability in Immersive Virtual Environment. *The International Journal of Virtual Reality*. 17(3), 27-51."



## 1. Introduction : conception de l'étude

Dans les études suivantes, nous nous focalisons, au travers de cinq expérimentations (une étude par facteur), sur l'impact de cinq facteurs d'influence sur les dix composants clés du modèle. Les résultats de ces cinq expérimentations sont décrits dans les sections 2 à 6. Concrètement, les quatre premières expérimentations ont été conçues avec des échantillons appariés (Tableau 30) pour deux raisons : premièrement, cela nous permettait de réduire le nombre de participants que nous aurions eu du mal à trouver, deuxièmement, cette configuration permettait de s'assurer que les niveaux d'expérience des technologies 3D était exactement les mêmes dans les deux conditions testées.

**Tableau 30. Liste des cinq expérimentations conduites dans l'étude 1**

Expérimentation n°	Facteurs d'influence	Variation des valeurs		Conception de l'expérience	Nombre de participants
		Val 1	Val 2		
1	LCV	106°	32°	Apparié	20
2	FI	70 FPS	30 FPS	Apparié	20
3	NI	Manette (rotation)	Clavier (pas de rotation)	Apparié	20
4	FC3D	Plan réduit	Pas de plan réduit	Apparié	20
5	EP	Expérimenté	Non expérimenté	Indépendant	35 - 37

*Note. LCV : largeur du champ visuel, FI : fréquence d'image, NI : niveau d'interactivité, FC3D : feedback du contenu 3D, EP : expérience précédente des technologies 3D*

Dans ces quatre expérimentations, l'ordre de passage était contrebalancé pour chaque participant (i.e., dans l'expérimentation n°1, le premier participant testait une LCV de 32° puis de 106°, le second participant testait une LCV de 106° puis de 32°, le troisième participant testait la LCV dans le même ordre que le premier participant, etc.).

Dans la cinquième expérimentation, deux groupes distincts (EP = expérimenté vs non expérimenté) expérimentaient dans les mêmes conditions (i.e., LCV = 106°, FI = 70 FPS, NI = manette, FC3D = plan réduit).

Pour finir, nous nous focalisons sur les relations d'interdépendance de ces composants. Ici un seul grand groupe expérimental (i.e., combinant les 5 groupes

expérimentaux précédemment évoqués) est considéré. Ces résultats généraux sont décrits dans la section 7. Les données brutes recueillies pour cette étude sont identiques à celles du chapitre précédent.

## **2. Expérimentation 1 : effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective**

### **2.1. Objectif et hypothèses**

L'objectif de cette expérimentation est d'explorer l'impact de la largeur du champ visuel sur les neuf composants de l'UX subjective et sur l'utilisabilité objective d'un EVI. Les constats présentés dans la section 2.4.1 de ce chapitre établissent des liens entre la largeur du champ visuel et le sentiment de présence, les conséquences de l'expérience (Lin & Parker, 2007), et d'autres perceptions telles que les émotions et le jugement (Mahlke, 2008). En conséquence, nous faisons l'hypothèse qu'un large champ visuel de l'EVI impacte l'UX subjective de manière positive (H1).

Dans cette même section, Mahlke (2008) établit également des liens entre la présentation (e.g., largeur du champ visuel) et l'utilisabilité objective (i.e., taux de réalisation de la tâche, temps passé sur une tâche). Par conséquent, nous proposons une deuxième hypothèse qui suggère qu'un large champ visuel de l'EVI impacte l'utilisabilité objective de manière positive (H2).

### **2.6 Participants**

Cette expérimentation a impliqué 20 participants (20 hommes) qui, rappelons-le, utilisent les mêmes données que la première étude décrite dans le CHAPITRE V. Ces participants avaient en moyenne 23,65 ans (ET = 5,12 ans ; Min = 18 ans ; Max = 39 ans). Un questionnaire d'identification permettait de recueillir des informations telles que le diplôme en préparation ou la profession des participants. Ces participants travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., RV, administrateur système, infographie).

### **2.7 Procédure**

La procédure de cette expérimentation était identique à celle décrite dans le CHAPITRE V. Les participants passaient par trois sessions dans l'EVI : une d'entraînement et deux effectives.

### **2.8 Tâches réalisées**

Les tâches réalisées dans cette expérimentation étaient identiques à celles décrites dans le CHAPITRE V.

## 2.9 Matériel et mesures

### 2.9.1 Environnement virtuel, questionnaire d'identification et questionnaire d'UX

L'environnement virtuel, le questionnaire d'identification et le questionnaire d'UX IVEQ utilisés dans cette étude sont identiques à ceux utilisés dans le CHAPITRE V. En revanche, nous n'avons utilisé, pour l'analyse des résultats, que les données des items qui ont été validés (cf. CHAPITRE V).

### 2.9.2 Mesures d'utilisabilité objective

L'utilisabilité objective dans cette expérimentation a été mesurée à travers le temps de réalisation de la tâche dans un niveau, le nombre d'erreurs, le score total et le niveau atteint. Le temps de réalisation de la tâche dans un niveau est le temps que les participants mettaient pour compléter le niveau n° 2 (i.e., le niveau atteint par tous les participants) dans l'EVI. Le nombre d'erreurs est le nombre d'erreurs (i.e., nombre de points perdus lorsque l'avatar du participant entrait en collision avec une créature) obtenus par un participant à la fin d'une session. Le score total est le score (i.e., le nombre de points gagnés) obtenu par un participant dans l'EVI à la fin d'une session. Le niveau atteint est le niveau que le participant atteignait à la fin d'une session.

## 2.10 Données collectées et analyse

### 2.10.1 Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective

Les données des scores aux échelles de cette expérimentation ont été collectées à travers le questionnaire d'UX IVEQ puis analysées. Le test de normalité (i.e., Shapiro Wilk) indique une différence non significative ( $p > 0,05$ ) des résultats des deux conditions de l'expérience (i.e., largeur de champ visuel =  $106^\circ$  ou  $32^\circ$ ), suggérant une validation de l'hypothèse de normalité. En conséquence, le calcul du test de Student pour échantillon apparié a été utilisé pour analyser les scores aux échelles dans les deux conditions.

### 2.10.2 Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective

Les données d'utilisabilité objective de cette expérimentation ont été collectées *via* des log (**ANNEXE 4 : EXEMPLE DE FICHIERS LOG DE L'UTILISATEUR N° 110**) puis analysées. Au vu du test de normalité, le calcul du test de Student pour échantillon apparié a également été utilisé pour analyser cette fois-ci le temps de réalisation de la tâche dans un niveau, le nombre d'erreurs, le score total, le niveau atteint dans l'EVI dans les deux conditions (i.e.,  $106^\circ$  ou  $32^\circ$ ).

## 2.11 Résultats

### 2.11.1 Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective

D'après notre première hypothèse (voir hypothèse H1 dans la section 2.1 de ce chapitre) nous nous attendons à ce que la largeur du champ visuel (LCV), affecte l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Pour explorer ce postulat, nous avons conduit une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 31). Elle ne révèle aucune influence de LCV sur les composants de l'UX subjective.

**Tableau 31. Effet de la largeur du champ visuel sur l'UX subjective : moyenne, écart type et valeur de t des scores pour l'expérimentation 1**

	LCV				t	p
	106°		32°			
	M	ET	M	ET		
Présence	7,46	1,16	7,37	1,18	0,86	0,40
Engagement	6,75	1,49	7,02	1,10	1,35	0,19
Immersion	6,30	1,47	6,60	1,53	1,39	0,18
Flow	7,27	1,39	7,15	1,54	0,50	0,63
Compétence	8,18	1,29	8,15	1,30	0,08	0,94
Emotion	5,50	1,11	5,25	0,88	1,25	0,23
Jugement	6,26	1,51	6,42	1,11	1,17	0,26
Conséquence de l'expérience	4,00	2,23	3,59	2,30	1,94	0,07
Adoption de la technologie	7,63	1,06	7,51	0,99	1,09	0,30

*Note. M : Moyenne ; ET : Ecart type ; LCV : largeur du champ visuel*

### 2.11.2 Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective

D'après la deuxième hypothèse (voir hypothèse H2 dans la section 2.1 de ce chapitre), nous prévoyons que LCV affecte l'utilisabilité objective. Pour répondre à cette hypothèse nous avons mené une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 32). Les résultats montrent l'effet de LCV sur le niveau atteint. En effet, la valeur moyenne de niveau atteint est significativement plus élevée dans la condition 106° comparée à la condition 32° – valeurs de LCV – ( $t = 2,13$ ,  $p = 0,046$ ).

**Tableau 32. Effet de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 1**

	LCV				t	p
	106°		32°			
	M	ET	M	ET		
Niveau atteint	4,55	0,83	4,10	0,85	2,13*	0,046
Score total	38,35	8,47	34,40	9,99	1,86	0,079
Temps de réalisation de la tâche dans le niveau 2 (sec)	72,02	19,69	65,92	24,16	0,98	0,341
Nombre d'erreurs	0,05	0,22	0,05	0,22	0,0	1,00

Note. \* $p < 0,05$  ; M : Moyenne ; ET : Ecart type ; LCV : largeur du champ visuel

### 3. Expérimentation 2 : effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective

#### 3.1 Objectif et hypothèses

L'objectif de cette étude expérimentale est d'explorer l'impact de la fréquence d'image sur les neuf composants de l'UX subjective et sur l'utilisabilité objective d'un EVI. Les constats présentés dans la section 2.4.1 du 0 établissent des liens entre la qualité de l'information (e.g., fréquence d'image) et le sentiment de présence (Cheng et al., 2014 ; Lin & Parker, 2007), le flow, les conséquences de l'expérience (Lin & Parker, 2007), mais aussi d'autres perceptions telles que l'émotion et le jugement (Mahlke, 2008). En conséquence, nous faisons l'hypothèse qu'une fréquence d'image élevée de l'EVI, impacte l'UX subjective de manière positive (H3).

Dans cette même section, Mahlke (2008) établit également des liens entre la présentation (e.g., fréquence d'image) et l'utilisabilité objective (i.e., taux de réalisation de la tâche, temps passé sur une tâche). Par conséquent, nous proposons une quatrième hypothèse qui suggère qu'une fréquence d'image élevée de l'EVI impacte l'utilisabilité objective de manière positive (H4).

#### 3.2 Participants

Cette étude a impliqué 20 participants (4 femmes, 16 hommes) qui, rappelons-le, utilisent les mêmes données que la première étude décrite dans le CHAPITRE V. Ces participants avaient en moyenne 22,45 ans (ET = 2,63 ans ; Min = 18 ans ; Max = 27 ans). Les participants de cette expérimentation travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de

l'informatique (e.g., RV, infographie, multimédia et internet, info-com). Les participants ont été recrutés de la même manière que pour l'expérimentation 1.

### 3.3 Procédure

La procédure de cette expérimentation était identique à celle décrite dans l'expérimentation 1.

### 3.4 Tâches réalisées

Les tâches réalisées dans cette expérimentation étaient identiques à celles décrites dans l'expérimentation 1.

### 3.5 Matériels et mesures

Le matériel et les mesures étaient identiques à ceux de l'expérimentation 1. Seules les valeurs configurées dans l'EVI diffèrent. Ce sont les valeurs de fréquence d'image (i.e., 30 FPS ou 70 FPS) qui ont été configurées dans l'EVI pour cette expérimentation. Ces valeurs ont été choisies car elles représentent de manière pertinente les facteurs influençant l'EVI selon la littérature scientifique. Typiquement, la fréquence d'image de 30 FPS a été choisie comme étant une limite basse mais qui permet à l'utilisateur de percevoir la fluidité dans le défilement d'image (Claypool & Claypool, 2007) et la valeur de 70 FPS a été choisie pour éviter le plus souvent possible l'effet de latence (Oculus Best Practices).

### 3.6 Données collectées et analyse

#### 3.6.1 Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective

Les données des scores aux échelles de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1, excepté le fait que les résultats concernent les deux conditions de la fréquence d'image : 70FPS ou 30FPS.

#### 3.6.2 Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective

Les données d'utilisabilité objective de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1.

## 3.7 Résultats

### 3.7.1 Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective

D'après notre troisième hypothèse (voir hypothèse H3 dans la section 3.1 de ce chapitre), nous nous attendions à ce que la fréquence d'image (FI) affecte l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Pour explorer ce postulat, nous avons conduit une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 33).

**Tableau 33. Effet de la fréquence d'image sur l'UX subjective : moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 2**

	FI				t	p
	70FPS		30FPS			
	M	ET	M	ET		
Présence	7,78	1,10	7,66	1,07	0,60	0,55
Engagement	7,12	1,49	6,43	1,70	2,23*	0,04
Immersion	6,49	1,69	6,21	1,77	1,00	0,33
Flow	7,19	1,15	7,12	1,23	0,35	0,73
Compétence	8,46	1,13	8,33	1,02	0,61	0,55
Emotion	4,98	0,91	4,57	0,93	2,32*	0,03
Jugement	6,01	1,08	5,98	1,23	0,15	0,88
Conséquence de l'expérience	3,63	2,58	3,54	2,55	0,34	0,74
Adoption de la technologie	7,29	1,11	7,43	1,02	0,97	0,35

*Note.* \* $p < 0,05$  ; M : Moyenne ; ET : Ecart type ; FI : fréquence d'image

Cette analyse révèle que FI a un effet sur l'engagement et l'émotion. En effet, dans la condition 70 FPS (i.e., 1<sup>ère</sup> valeur de FI), les valeurs moyennes d'engagement ( $t = 2,23$ ,  $p = 0,04$ ), d'émotion ( $t = 2,32$ ,  $p = 0,03$ ) sont significativement plus élevées que dans la condition 30 FPS (i.e., 2<sup>nd</sup> valeur de FI).

### 3.7.2 Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective

D'après la quatrième hypothèse (voir hypothèse H4 dans la section 3.1 de ce chapitre), nous prévoyons que FI affecte l'utilisabilité objective. Pour répondre à cette hypothèse nous avons mené une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau

34). Les résultats montrent l'effet de FI sur le niveau atteint et le score total. En effet, la valeur moyenne de niveau atteint est significativement plus élevée dans la condition 70FPS comparée à la condition 30FPS – valeurs de FI – ( $t = 2,36$  ,  $p = 0,03$ ). Par ailleurs, la valeur moyenne du score total est également significativement plus élevée dans la condition 70FPS comparée à la condition 30FPS ( $t = 2,91$  ,  $p = 0,009$ ).

**Tableau 34. Effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 2**

	FI				<i>t</i>	<i>p</i>
	70FPS		30FPS			
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>		
Niveau atteint	4,45	0,89	3,95	0,83	2,36*	0,03
Score total	38,35	10,85	31,45	8,27	2,91*	0,01
Temps de réalisation de la tâche dans le niveau 2 (sec)	72,82	19,63	76,31	25,46	0,49	0,63
Nombre d'erreurs	0,05	0,22	0,15	0,37	1,45	0,16

*Note.* \* $p < 0,05$  ; *M* : Moyenne ; *ET* : Ecart type ; *FI* : fréquence d'image

#### 4. Expérimentation 3 : effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective

##### 4.1 Objectif et hypothèses

L'objectif de cette étude expérimentale est d'explorer l'impact du feedback du contenu 3D sur les neuf composants de l'UX subjective et sur l'utilisabilité objective d'un EVI. Les constats présentés dans la section 2.4.1 du 0 établissent des liens entre les retours visuelles (e.g., feedback du contenu 3D) et le divertissement (i.e., flow), les conséquences de l'expérience (Lin & Parker, 2007). En conséquence, nous faisons l'hypothèse que la présence de feedback du contenu 3D de l'EVI impacte l'UX subjective de manière positive (H5).

Dans cette même section, Mahlke (2008) établit également des liens entre le dialogue (e.g., feedback du contenu) et l'utilisabilité objective (i.e., taux de réalisation de la tâche, temps passé sur une tâche). Par conséquent, nous proposons une sixième hypothèse qui suggère que la présence de feedback du contenu 3D de l'EVI impacte l'utilisabilité objective de manière positive (H6).

## 4.2 Participants

Cette étude a impliqué 20 participants (1 femme, 19 hommes) qui, rappelons-le, utilisent les mêmes données que la première étude décrite dans le CHAPITRE V. Ces participants avaient en moyenne 22,75 ans (ET = 3,73 ans ; Min = 18 ans ; Max = 30 ans). Les participants de cette expérimentation travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., RV, infographie, multimédia et internet, info-com). Un participant étudiait dans le domaine du génie biologique. Les participants ont été recrutés de la même manière que pour l'expérimentation 1.

## 4.3 Procédure

La procédure de cette expérimentation était identique à celle décrite dans l'expérimentation 1.

## 4.4 Tâches réalisées

Les tâches réalisées dans cette expérimentation étaient identiques à celles décrites dans l'expérimentation 1.

## 4.5 Matériel et mesures

Le matériel et les mesures étaient identiques à ceux de l'expérimentation 1. Seules les valeurs configurées dans l'EVI diffèrent. Ce sont les valeurs de feedback du contenu 3D (i.e., présence ou non du plan réduit) qui ont été configurées dans l'EVI pour cette expérimentation. Ces valeurs ont été choisies car elles représentent de manière pertinente les facteurs influençant l'EVI selon la littérature scientifique. Typiquement, le plan réduit a été choisi en tant que retour visuel de navigation dans l'EVI de manière à aider l'utilisateur à acquérir une meilleure connaissance spatiale de par la combinaison de deux types de navigation (i.e., plan vu du dessus et vue à la troisième personne) (Richardson et al., 1999).

## 4.6 Données collectées et analyse

### 4.6.1 Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective

Les données des scores aux échelles de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1, excepté que les résultats concernent les deux conditions de feedback du contenu 3D : présence ou non du plan réduit.

#### 4.6.2 Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective

Les données d'utilisabilité objective de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1.

### 4.7 Résultats

#### 4.7.1 Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective

D'après notre cinquième hypothèse (voir hypothèse H5 dans la section 4.1 de ce chapitre), nous nous attendons à ce que le feedback du contenu 3D (FC3D) affecte l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Pour explorer ce postulat, nous avons conduit une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 35). Elle ne révèle aucune influence de FC3D sur les composants de l'UX subjective.

**Tableau 35. Effet du feedback du contenu 3D sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 3**

	FC3D				<i>t</i>	p
	Plan		Pas de plan			
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>		
Présence	7,71	1,31	7,55	1,14	1,10	0,28
Engagement	6,98	1,93	6,80	1,63	0,85	0,41
Immersion	5,98	1,69	6,25	1,71	0,99	0,34
Flow	6,81	1,40	6,92	1,30	0,52	0,61
Compétence	8,51	1,01	8,59	0,99	0,58	0,57
Emotion	4,66	1,05	4,62	1,16	0,27	0,79
Jugement	6,13	1,47	6,38	1,37	1,50	0,15
Conséquence de l'expérience	3,68	2,48	4,06	2,58	1,59	0,13
Adoption de la technologie	7,29	0,71	7,26	0,73	0,19	0,85

*Note. M : Moyenne ; ET : Ecart type ; FC3D : feedback du contenu 3D*

#### 4.7.2 Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective

D'après la sixième hypothèse (voir hypothèse H6 dans la section 4.1 de ce chapitre), nous prévoyons que FC3D affecte l'utilisabilité objective. Pour répondre à cette hypothèse nous avons mené une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 36). Elle ne révèle aucune influence de FC3D sur l'utilisabilité objective.

**Tableau 36. Effet du feedback du contenu 3D sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 3**

	FC3D					
	Plan réduit		Pas de plan réduit		t	p
	M	ET	M	ET		
Niveau atteint	4,40	0,50	4,25	0,55	0,90	0,38
Score total	38,90	5,82	37,15	7,46	0,98	0,34
Temps de réalisation de la tâche dans le niveau 2 (sec)	64,77	15,15	70,24	17,98	0,93	0,36
Nombre d'erreurs	0	0	0	0	NaN	NaN

*Note. M : Moyenne ; ET : Ecart type ; FC3D : feedback du contenu 3D*

## 5. Expérimentation 4 : effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective

### 5.1 Objectif et hypothèses

L'objectif de cette étude expérimentale est d'explorer l'impact du niveau d'interactivité sur les neuf composants de l'UX subjective et sur l'utilisabilité objective d'un EVI. Les constats présentés dans la section 2.4.1 du 0 établissent des liens entre le niveau d'interactivité et les conséquences de l'expérience (Lin & Parker, 2007), le flow, les compétences et le sentiment de présence (Cheng et al., 2014). En conséquence, nous faisons l'hypothèse qu'un niveau d'interactivité élevé de l'EVI impacte l'UX subjective de manière positive (H7).

Dans cette même section, Mahlke (2008) établit également des liens entre la fonctionnalité (e.g., niveau d'interactivité) et l'utilisabilité objective (i.e., taux de réalisation de la tâche, temps passé sur une tâche). Par conséquent, nous proposons une huitième hypothèse qui suggère qu'un niveau d'interactivité élevé de l'EVI impacte l'utilisabilité objective de manière positive (H8).

## 5.2 Participants

Cette étude a impliqué 20 participants (2 femmes, 18 hommes) qui, rappelons-le, utilisent les mêmes données que la première étude décrite dans le CHAPITRE V. Ces participants avaient en moyenne 21,95 ans (ET = 3,15 ans ; Min = 18 ans ; Max = 30 ans), et travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., RV, informatique, multimédia et internet, info-com). Les participants ont été recrutés de la même manière que pour l'expérimentation 1.

## 5.3 Procédure

La procédure de cette expérimentation était identique à celle décrite dans l'expérimentation 1.

## 5.4 Tâches réalisées

Les tâches réalisées dans cette expérimentation étaient identiques à celles décrites dans l'expérimentation 1.

## 5.5 Matériel et mesures

Le matériel et les mesures étaient identiques à ceux de l'expérimentation 1. Seules les valeurs configurées dans l'EVI diffèrent. Ce sont les valeurs de niveau d'interactivité (i.e., possibilité de rotation ou non) qui ont été configurées dans l'EVI pour cette expérimentation. Ces valeurs ont été choisies car elles représentent de manière pertinente les facteurs influençant l'EVI selon la littérature scientifique. Typiquement, la rotation du corps en tant que caractéristique du niveau d'interactivité fait partie des interactions de base dans un EVI. Elle contribue à la perception proprioceptive du mouvement du corps (Slater & Wilbur, 1997).

## 5.6 Données collectées et analyse

### 5.6.1 Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective

Les données des scores aux échelles de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1, excepté que les résultats concernent les deux conditions de niveau d'interactivité : possibilité de rotation (avec une manette) ou non (avec un clavier).

## 5.6.2 Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective

Les données d'utilisabilité objective de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1.

## 5.7 Résultats

### 5.7.1 Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective

D'après notre septième hypothèse (voir hypothèse H7 dans la section 5.1 de ce chapitre) nous nous attendons à ce que le niveau d'interactivité (NI) affecte l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Pour explorer ce postulat, nous avons conduit une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 37).

**Tableau 37. Effet du niveau d'interactivité sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 4**

	NI				t	p
	Manette		Clavier			
	M	ET	M	ET		
Présence	7,53	1,24	5,41	1,25	5,36*	<0,001
Engagement	6,65	1,43	5,12	2,11	4,21*	<0,001
Immersion	6,39	1,81	5,43	2,13	2,94*	0,008
Flow	7,18	1,54	6,17	1,80	3,68*	0,002
Compétence	8,38	1,02	7,13	1,19	5,81*	<0,001
Emotion	4,81	1,18	4,77	1,32	0,24	0,81
Jugement	6,27	1,46	5,63	1,59	2,86*	0,01
Conséquence de l'expérience	3,19	1,93	3,41	1,73	0,71	0,49
Adoption de la technologie	7,29	1,09	6,55	1,34	2,76*	0,01

Note. \* $p < 0,05$  ; M : Moyenne ; ET : Ecart type ; NI : niveau d'interactivité

Cette analyse révèle que NI a un effet sur la présence, l'engagement, l'immersion, le flow, les compétences, le jugement et l'adoption de la technologie. En effet, dans la condition *manette* (i.e., 1<sup>ère</sup> valeur de NI), les valeurs moyennes de présence ( $t = 5,36$ ,  $p < 0,001$ ), d'engagement ( $t = 4,21$ ,  $p < 0,001$ ), d'immersion ( $t = 2,94$ ,  $p = 0,008$ ), de flow ( $t = 3,68$ ,  $p = 0,002$ ), de compétences ( $t = 5,81$ ,  $p < 0,001$ ), de jugement ( $t =$

2,86 ,  $p = 0,01$ ) et d'adoption de la technologie, ( $t = 2,76$  ,  $p = 0,01$ ) sont significativement plus élevées que dans la condition *clavier* (i.e., 2<sup>nd</sup> valeur de NI).

### 5.7.2 Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective

D'après la huitième hypothèse (voir hypothèse H8 dans la section 5.1 de ce chapitre), nous prévoyons que NI affecte l'utilisabilité objective. Pour répondre à cette hypothèse nous avons mené une analyse statistique pour échantillon apparié (Tableau 38). Les résultats montrent l'effet de NI sur le niveau atteint et le score total. En effet, la valeur moyenne de niveau atteint est significativement plus élevée dans la condition *manette* comparée à la condition *clavier* – valeurs de NI – ( $t = 3,39$  ,  $p = 0,003$ ). En outre, la valeur moyenne du score total est également significativement plus élevée dans la condition *manette* comparée à la condition *clavier* ( $t = 3,96$  ,  $p < 0,001$ ).

**Tableau 38. Effet du niveau d'interactivité sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 4**

	NI				<i>t</i>	<i>p</i>
	Manette		Clavier			
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>		
Niveau atteint	4,60	0,68	3,90	0,55	3,39*	0,003
Score total	38,45	7,49	29,35	6,45	3,96*	<0,001
Temps de réalisation de la tâche dans le niveau 2 (sec)	72,59	19,92	80,03	27,34	0,89	0,39
Nombre d'erreurs	0,1	0,30	0,15	0,49	0,37	0,72

Note. \* $p < 0,05$  ; *M* : Moyenne ; *ET* : Ecart type ; *NI* : niveau d'interactivité

## 6. Expérimentation 5 : effet de l'expérience précédente sur l'UX subjective et l'utilisabilité objective

### 6.1 Objectif et hypothèses

L'objectif de cette étude expérimentale est d'explorer l'impact de l'expérience précédente des technologies 3D sur les neuf composants de l'UX subjective et sur l'utilisabilité objective des EVI. Les constats présentés dans la section 2.4.2 du 0 établissent des liens entre l'expérience précédente de l'utilisateur et le sentiment de présence, les compétences (Cheng et al., 2014), l'adoption de la technologie (Shin et al., 2013), les émotions (Geslin et al., 2011), le ressenti subjectif de l'utilisateur (Mahlke, 2008). Au vue de ces constats nous faisons l'hypothèse qu'une expérience

précédente avec les technologies 3D impacte l'UX subjective de manière positive (H9).

Dans cette même section, Mahlke (2008) et Plocher et al. (1999) établissent également un lien entre l'expérience précédente et l'utilisabilité objective. Nous faisons donc l'hypothèse qu'une expérience précédente avec les technologies 3D impacte l'utilisabilité objective de manière positive (H10).

## 6.2 Participants

Les participants qui, rappelons-le, utilisent les mêmes données que la première étude décrite dans le CHAPITRE V, ont été recrutés de la même manière que pour l'expérimentation 1 à 4, à la seule différence que pour cette expérimentation, ils ont été sélectionnés selon leur expérience précédente avec les technologies 3D. Ils ont été répartis dans deux groupes expérimentaux (i.e., avec ou sans expérience) selon des critères de fréquence d'usage des technologies 3D telles que les casque de RV, manette de jeu, joystick, Kinect, Leap Motion ou des jeux ou logiciels 3D telles que Virtools, Unity3D, 3DSMax, Maya, AutoCAD.

Le premier groupe (avec une expérience précédente) était composé de 35 participants (5 femmes, 30 hommes) âgés en moyenne de 22,97 ans (ET = 4,22 ans ; Min = 18 ans ; Max = 34 ans). Le même questionnaire d'identification que dans l'expérimentation 1 a été utilisé, son analyse indiquait que 25 participants de ce groupe travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., RV, informatique, multimédia et internet, info-com, administrateur réseaux, web), 5 participants provenaient de domaine divers (e.g., technique de commercialisation, matériaux composites, génie biologique, militaire, opérateur, banque assurance).

Le second groupe (pas d'expérience précédente) était composé de 37 participants (16 femmes, 21 hommes) âgés en moyenne de 27,62 ans (ET = 11,63 ans ; Min = 19 ; Max = 63). L'analyse du questionnaire d'identification indique que 17 participants de ce groupe travaillaient ou étudiaient dans les domaines des Technologies l'Information et de la Communication (TIC) ou de l'informatique (e.g., informatique, multimédia et internet, web designer, infographie), 14 participants provenaient de domaine divers (e.g., banque assurance, chargé de communication, éducateur spécialisé, langues, marketing, publicité, graphiste, serveur).

Les deux groupes expérimentaux indépendants présentaient une différence significative en termes d'expérience précédente avec les technologies 3D. Le questionnaire d'identification permettant de recueillir leur expérience précédente avec les technologies 3D étant codé (0 = Jamais, 1 = Parfois, 2 = Souvent, 3 = Très souvent) nous avons pu calculer les moyennes et écart type des résultats obtenus : groupe avec expérience précédente (M = 15,09 , ET = 5,36 , Min = 11 , Max = 33), groupe sans expérience précédente (M = 6,46 , ET = 2,80 , Min = 1 , Max = 10) ;  $t(70) = 8,62$  ,  $p < 0,001$ .

### 6.3 Procédure

La procédure de cette expérimentation était identique à celle décrite dans le CHAPITRE V à l'exception que les participants passaient par deux sessions dans l'EVI pour cette expérimentation au lieu de trois, une d'entraînement et une effective du fait de leur caractéristique de groupes indépendants. De plus, chaque participant passait entre 30 et 45 minutes d'expérimentation.

### 6.4 Tâches réalisées

Les tâches réalisées dans cette expérimentation étaient identiques à celles décrites dans l'expérimentation 1.

### 6.5 Matériel et mesures

Le matériel et les mesures étaient identiques à ceux de l'expérimentation 1. Seules les valeurs configurées dans l'EVI diffèrent. Les valeurs de largeur du champ visuel, fréquence d'image, feedback du contenu 3D et niveau d'interactivité ont été configurées dans l'EVI à leur valeur optimale (i.e., respectivement 160°, 70FPS, présence du plan réduit, manette) pour cette expérimentation.

### 6.6 Données collectées et analyse

#### 6.6.1 Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'UX subjective

Les données des scores aux échelles de cette expérimentation ont été collectées et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1. La variable considérée était ici l'expérience avec les technologies 3D (utilisateur expérimenté versus non expérimenté). De fait, l'analyse statistique s'appuie sur les tests pour échantillons indépendants.

#### 6.6.2 Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective

Les données d'utilisabilité objective de cette expérimentation ont été collectés et analysées de la même manière que dans l'expérimentation 1. Les calculs statistiques ont été analysés pour échantillons indépendants.

## 6.7 Résultats

### 6.7.1 Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'UX subjective

Selon notre neuvième hypothèse (voir hypothèse H9 dans la section 6.1 de ce chapitre), nous prévoyons que l'expérience précédente affecte les composants de l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Pour explorer cette hypothèse nous avons conduit une analyse statistique pour échantillon indépendant (Tableau 39).

**Tableau 39. Effet de l'expérience précédente sur l'UX subjective : Moyenne, écart type et valeur de t des scores des sous-échelles pour l'expérimentation 5**

	EP				t	p
	Expérience précédente		Pas d'expérience précédente			
	M	ET	M	ET		
Présence	8,06	1,01	7,49	1,03	2,36*	0,02
Engagement	7,75	1,45	7,62	1,43	0,39	0,70
Immersion	7,11	1,49	6,35	2,03	1,81	0,07
Flow	7,45	1,25	7,07	1,41	1,21	0,23
Compétence	8,30	1,26	6,99	1,85	3,48* <sup>a</sup>	<0,001
Emotion	5,39	0,97	5,21	1,13	0,72	0,48
Jugement	7,13	1,60	7,03	1,31	0,30	0,77
Conséquence de l'expérience	3,43	2,47	4,12	2,39	1,20	0,24
Adoption de la technologie	7,20	1,38	6,38	1,38	2,51*	0,01

Note. \* $p < 0,05$  ; <sup>a</sup>Utilisation du test de Welch-Satterthwaite ; M : Moyenne ; ET : Ecart type ; EP : expérience précédente des technologies 3D

Cette analyse révèle que EP a un effet sur la présence, les compétences et l'adoption de la technologie. En effet, dans la condition *expérimenté* (1<sup>ère</sup> valeur de EP), les valeurs moyennes de présence ( $t = 2,36$  ,  $p = 0,02$ ), de compétences ( $t = 3,48$  ,  $p < 0,001$ ) et d'adoption de la technologie ( $t = 2,51$  ,  $p = 0,01$ ) sont significativement plus élevées comparées à la condition *non expérimenté* (2<sup>nd</sup> valeur de EP).

### 6.7.2 Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective

Selon la dixième hypothèse (voir hypothèse H10 dans la section 6.1 de ce chapitre), nous nous attendons à ce que l'expérience précédente avec les technologies 3D de l'utilisateur (EP) affecte les métriques de l'utilisabilité objective. Pour explorer ce postulat nous avons mené une analyse statistique pour échantillon indépendant (Tableau 40). Elle révèle en effet que EP a un effet sur le niveau atteint, le score total, le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs. En effet, dans la condition *expérimenté*, les valeurs moyennes de niveau atteint ( $t = 3,41$ ,  $p = 0,001$ ), score total ( $t = 3,58$ ,  $p < 0,001$ ) et temps de réalisation de la tâche ( $t = 2,09$ ,  $p = 0,04$ ) sont significativement supérieures comparées à la condition *non expérimenté*. Et la valeur moyenne du nombre d'erreurs est significativement inférieure ( $t = 2,35$ ,  $p = 0,02$ ) comparée à la condition *non expérimenté*.

**Tableau 40. Effet de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur l'utilisabilité objective : moyenne, écart type et valeur de t des métriques de l'utilisabilité objective pour l'expérimentation 5**

	EP					
	Expérience précédente avec les technologies 3D		Pas d'expérience précédente avec les technologies 3D		t	p
	M	ET	M	ET		
Niveau atteint	4,14	0,49	3,58	0,84	3,41 <sup>*a</sup>	0,001
Score total	33,57	5,68	26,83	9,63	3,58 <sup>*a</sup>	<0,001
Temps de réalisation de la tâche dans le niveau 2 (sec)	77,04	23,03	93,78	41,71	2,09 <sup>*a</sup>	0,04
Nombre d'erreurs	0,11	0,32	0,47	0,85	2,35 <sup>*a</sup>	0,02

Note. <sup>\*</sup> $p < 0,05$  ; <sup>a</sup>Utilisation du test de Welch-Satterthwaite ; M : Moyenne ; ET : Ecart type ; EP : expérience précédente des technologies 3D

## **7. Résultats généraux : validation de l'interdépendance des composants du modèle d'UX IVEM**

### **7.1 Introduction et hypothèses**

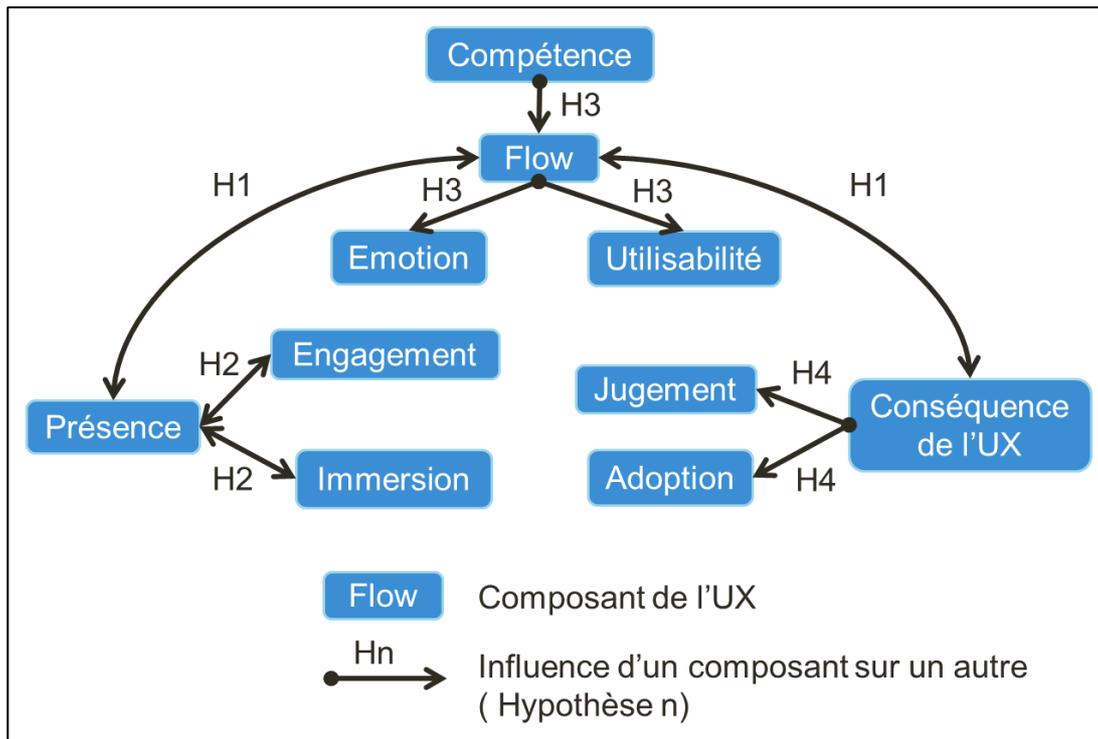
Nous avons cherché à valider les relations entre les composants du modèle à travers quatre hypothèses (Figure 29).

Dans la section 2.3.1 du 0, nous avons vu que les composants de présence, flow et conséquence de l'expérience étaient liés (Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Zhou & Lu, 2011 ; Lin & Parker, 2007). Au vu de ces constats, nous faisons l'hypothèse que des conséquences de l'expérience ressenties à un degré faible ou nul associées à un sentiment de présence positif conduisent à un ressenti positif du degré de flow qui en retour influence de manière positive les deux premiers composants (i.e., présence et conséquence de l'expérience) (H11).

Dans la section 2.3.2 du 0, nous présentons le constat de Witmer et Singer (1998) qui lie les composants de présence, engagement et immersion. Sur la base de ce constat, nous émettons une deuxième hypothèse. Elle stipule qu'un sentiment de présence positif conduit à un degré d'engagement et de sentiment d'immersion positif, de la même manière que ces deux derniers influencent le sentiment de présence de manière positive (H12)

Nous avons également fait le constat dans la section 2.3.3 du 0, que le flow, l'utilisabilité, les compétences et l'émotion s'influençaient (Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Csikszentmihalyi, 1990). En conséquence, nous faisons l'hypothèse que les compétences perçues de manière positive influencent l'état de flow positivement qui en retour influence l'utilisabilité perçue et les émotions de manière positive également (H13).

Nous observons par ailleurs dans la section 2.3.4 du 0, que les composants de conséquences de l'expérience, de jugement et d'adoption de la technologie s'influençaient également (Shin et al., 2013 ; Mahlke, 2008). Par conséquent, nous proposons une quatrième hypothèse qui suggère que les conséquences de l'expérience perçues positivement (i.e., présence de symptômes) influencent le jugement global et la propension à adopter la technologie des EVI de manière négative (H14).



**Figure 29. Modèle théorique IVEM et les quatre hypothèses sur l'interdépendance des composants**

## 7.2 Données collectées et analyse

### 7.2.1 Mesure de l'UX subjective

Les données de l'UX subjective des expérimentations 1 à 5 ont été considérées. Nous nous sommes basés sur l'ensemble des passations correspondant aux 5 expérimentations précédentes, afin de constituer un groupe de participants de grande taille. De manière plus précise, nous avons ainsi considéré les réponses des questionnaires des participants des expérimentations 1 à 4 (20 participants par expérimentation) mais uniquement après les passations dans la condition optimale du paramètre considéré (les autres paramètres étant fixés à leur maximum). Ainsi nous avons pu ajouter les 72 participants de l'expérimentation 5 qui ont utilisé l'application avec tous les paramètres optimaux. Ce qui a permis de constituer un ensemble de données correspondant à 152 passations réalisées dans les mêmes conditions expérimentales.

### 7.2.2 Mesure d'utilisabilité objective

Les données de l'utilisabilité objective des expérimentations 1 à 5 ont également été rassemblées et analysées comme un seul groupe expérimental. Plus exactement les

logs (e.g., niveau atteint, temps de réalisation de la tâche) provenant des 152 passations dans l'EVI ont considérés.

### 7.2.3 Modélisation par équation structurelle

Une modélisation par équation structurelle (MES) nous a permis de déterminer la cohérence des relations d'interdépendance des composants de notre modèle avec les données expérimentales des 152 participants.

Cette méthode, en plus de permettre une certaine maniabilité des données (e.g., supprimer les données d'un item, d'un composant en quelques secondes), permet l'analyse de modèles complexes et l'association de différents types de données (i.e., subjectives, objectives) (Wolf et al., 2013). Cependant, il s'agit d'une méthode complexe étudiée depuis les années 1970 jusqu'à nos jours. Elle a été associée par le passé à l'idée qu'une taille d'échantillon élevée (Nunnally, 1967) favorisait les résultats positivement. Or, de nouvelles études démontrent que l'association entre taille d'échantillon et résultat est bien plus complexe. Par exemple, Wolf et al. (2013, p. 926) indiquent que la taille d'échantillon minimale recommandée peut diminuer si le nombre de composants à mesurer et le nombre d'items par composants est élevé (e.g., 8 items par composant). Par ailleurs, la réalité du terrain démontre la difficulté à réunir dans certains domaines la taille d'échantillon minimale recommandée ce qui donne lieu à des études MES pour petit échantillon (Bentler & Yuan, 1999, p. 181). Compte tenu de ces éléments, nous avons considéré que notre taille d'échantillon (i.e.,  $N = 152$ ) ainsi que la complexité de notre modèle (i.e., 10 composants) convenait pour une analyse MES, même si cette limitation reste à considérer dans notre discussion.

Les scores aux échelles du questionnaire IVEQ (i.e., mesure de l'UX subjective) et les mesures de l'utilisabilité objective des participants constituent les données principales de cette analyse. Grâce à ces données, nous avons pu construire un modèle structurel sur la base de notre modèle théorique dans le logiciel SPSS® AMOS 24. La génération de l'analyse du modèle structurel construit dans le logiciel constitue la première étape de cette modélisation. Afin d'évaluer la cohérence des données recueillies avec notre modèle structurel, l'observation de quatre indices de la qualité d'ajustement générés par l'analyse est recommandée : l'indice comparatif de l'ajustement (Comparative Fit Index ou CFI), l'indice de l'ajustement normalisé (Normed Fit Index ou NFI), l'erreur quadratique moyenne de l'approximation (Root Mean Square Error of Approximation ou RMSEA) et le ratio  $\chi^2$  sur le degré de liberté. Les indices de la qualité d'ajustement recommandés sont présentés dans le Tableau 41. Cette observation nous permettra, s'il n'y a pas de correspondance des indices, d'ajuster le modèle structurel par la proposition d'un modèle modifié. Les données de la totalité des participants ont été prises en compte.

**Tableau 41. Valeurs recommandées d'indices de l'ajustement pour une Modélisation par Equation Structurelle**

Indice de correspondance	Valeur recommandée	Source
CFI	> 0,9	(Bagozzi & Yi, 1988)
NFI	> 0,9	(Bentler, 1990)
RMSEA	< 0,08	(Kline, 2005)
$\chi^2/df$	< 5	(Bagozzi & Yi, 1988)

*Note. CFI : Indice comparatif de l'ajustement ; NFI : Indice de l'ajustement normalisé ; RMSEA : Erreur quadratique moyenne de l'approximation ;  $\chi^2/df$  : Ratio entre  $\chi^2$  et le degré de liberté*

### 7.3 Résultats : validation de l'interdépendance des composants du modèle d'UX IVEM

#### 7.3.1 Mesure de l'UX subjective

Les mesures moyennes de l'UX subjective (e.g., présence, engagement, immersion, ...) sont présentées dans le Tableau 42. Ces données (sauf celles de l'utilisabilité subjective) sont prises en compte dans l'analyse MES.

**Tableau 42. Mesure de l'UX subjective : moyenne et écart type des composants des dix composants de l'UX subjective**

Mesure de l'UX subjective	Moyenne	Ecart Type
Présence	7,69	1,06
Engagement	7,25	1,64
Immersion	6,14	1,71
Flow	7,35	1,32
Compétence	8,00	1,54
Emotion	6,96	1,07
Conséquence de l'expérience	7,27	2,31
Jugement	6,84	1,47
Adoption de la technologie	7,98	1,40

#### 7.3.2 Mesure d'utilisabilité objective

Les mesures moyennes de l'utilisabilité objective (i.e., temps de réalisation de la tâche, nombre d'erreurs, score total, niveau atteint) sont présentées dans le Tableau 43. Ces données sont prises en compte dans l'analyse MES à la place des données de l'utilisabilité subjective. L'analyse de l'échelle d'utilisabilité subjective s'est révélée non cohérente dans le chapitre de validation du questionnaire (voir section 2.7 du

CHAPITRE V) ce qui motive notre décision de ne pas la prendre en compte dans cette analyse.

**Tableau 43. Mesures d'utilisabilité objective : moyenne et écart type du niveau atteint, du score total, du temps de réalisation de la tâche et du nombre d'erreurs**

Mesure d'utilisabilité objective	Moyenne	Ecart type
Niveau atteint	4,17 / 6	0,87
Score total	34,36 / 67	9,73
Temps de réalisation de la tâche dans un niveau (sec)	77,08	28,86
Nombre d'erreurs	0,16	0,49

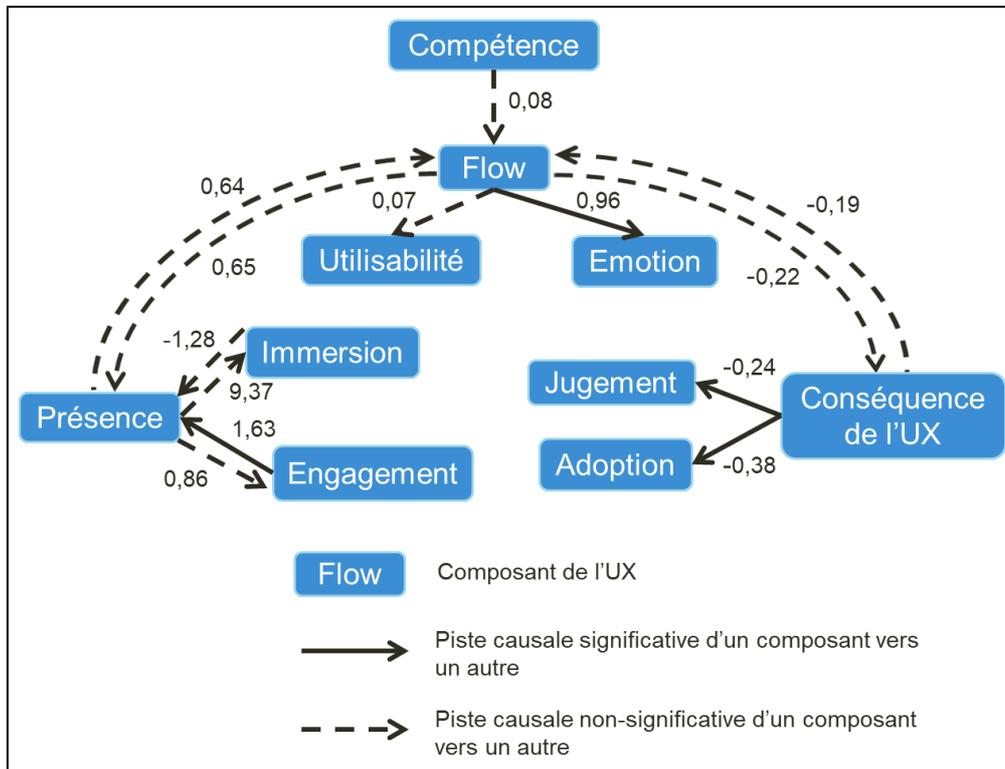
### 7.3.3 Modélisation par équation structurelle

À partir du modèle théorique d'UX IVEM de base, nous avons généré une analyse par équation structurelle. Plus précisément, les relations faisant l'objet des quatre hypothèses (voir hypothèses H11 à H14 dans la section 7.1 de ce chapitre) sur l'interdépendance des composants, ont été compilées et analysées dans un modèle structurel pour tester la structure des relations de notre modèle. L'analyse du modèle structurel a permis d'aboutir à de meilleures valeurs de pistes causales entre composants en éliminant les données provenant d'un item de la sous-échelle de présence et de 6 items provenant de la sous-échelle d'émotion. Cependant, cette analyse a aussi révélé une faible correspondance des indices de qualité d'ajustement pour la structure des relations proposée. Un modèle modifié a donc été proposé présentant une légère amélioration des indices de qualité d'ajustement et une structure des relations statistiquement significative.

#### *Modèle structurel*

Nous avons analysé la significativité des pistes causales entre composants (présenté dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et la correspondance des indices de la qualité d'ajustement du modèle structurel. Cette analyse révèle trois pistes causales entre composants statistiquement significatives et neuf autres non-significatives. Nous avons donc rejeté ces neuf relations (voir Tableau 44). Par ailleurs, les indices de la qualité d'ajustement indiquent que la valeur de CFI est égale à 0,539, celle de NFI est égale à 0,390 et celle de RMSEA est égale à 0,086, ce qui correspond à une faible correspondance du modèle structurel aux données. Cependant,  $\chi^2/df$  atteint un niveau acceptable (i.e., 2,098).

Selon Kline (1998), un minimum de quatre indices de la qualité d'ajustement devrait correspondre aux valeurs recommandées pour que le modèle structurel soit considéré comme acceptable. Or, un seul indice de la qualité d'ajustement (i.e.,  $\chi^2/df$ ) indique une correspondance avec la valeur recommandée (i.e.,  $\chi^2/df < 5$ ) pour ce modèle structurel. Ce dernier est donc faiblement acceptable.



**Figure 30. Modèle structurel représenté avec les coefficients des pistes causales entre composants**

**Tableau 44. Résultat de l'analyse du modèle structurel avec les pistes causales retenues et rejetées**

<i>Hypothèse</i>	<i>De</i>	<i>à</i>	<i>Piste causale</i>	<i>Résultat</i>
1	Présence	Flow	0,641	Rejetée
1	Flow	Présence	0,651	Rejetée
1	Flow	Conséquence de l'expérience	-0,215	Rejetée
1	Conséquence de l'expérience	Flow	-0,193	Rejetée
2	Présence	Engagement	0,860	Rejetée
2	Engagement	Présence	1,627**	Retenue
2	Présence	Immersion	9,368	Rejetée
2	Immersion	Présence	-1,279	Rejetée
3	Flow	Utilisabilité	0,067	Rejetée
3	Flow	Emotion	0,962***	Retenue
3	Compétence	Flow	0,078	Rejetée
4	Conséquence de l'expérience	Jugement	-0,236*	Retenue
4	Conséquence de l'expérience	Adoption de le technologie	-0,381***	Retenue

*Note.* \* $P < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$

### *Modèle modifié*

Le modèle théorique de base IVEM a été modifié dans le but d'améliorer la structure des relations du modèle structurel. Nous avons voulu identifier toutes les pistes causales entre composants statistiquement significatives de notre modèle. Pour ce faire, une analyse de covariance a été conduite via le logiciel SPSS® AMOS. Cette analyse a révélé un total de 32 covariances hypothétiques parmi lesquelles 16 sont statistiquement significatives. 7 de ces 16 relations coïncident avec les 13 relations suggérées dans le modèle théorique de base IVEM. Les 6 autres relations du modèle qui n'ont aucune correspondance ont été supprimées. 9 des 16 relations statistiquement significatives révélées par l'analyse ont été ajoutées formant ainsi un modèle modifié de 16 relations au total (voir Tableau 45 et Figure 31. REPRESENTATION DU MODELE MODIFIE IVEM AVEC LES 7 RELATIONS D'ORIGINES ET LES 9 RELATIONS AJOUTEES

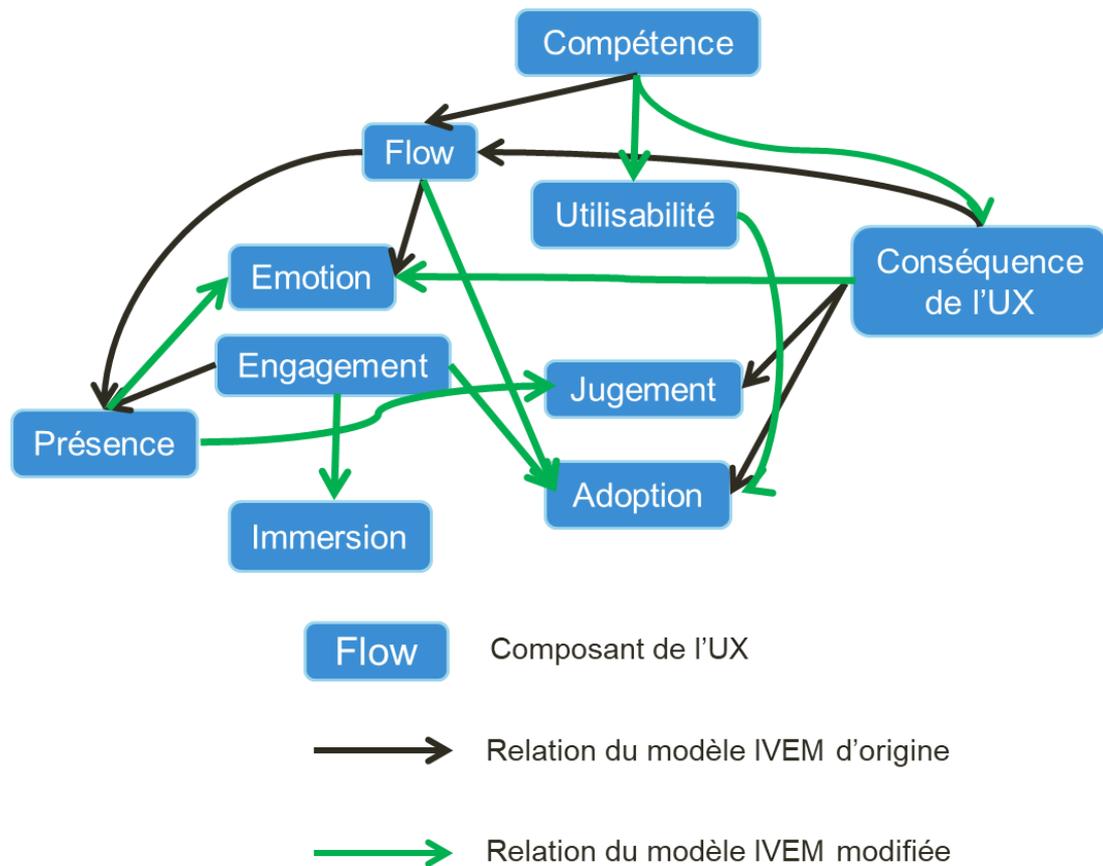
).

**Tableau 45. 16 pistes causales statistiquement significatives du modèle modifié**

Note. H : hypothèses ; ET : Ecart type ; \* $p < 0,05$  ; \*\* $p < 0,01$  ; \*\*\* $p < 0,001$

H	From	To	Piste causale	ET
<i>Relations d'origine</i>				
1	Flow	Présence	0,168*	0,066
1	Conséquence de l'expérience	Flow	-0,098*	0,046
2	Engagement	Présence	0,365***	0,082
3	Compétence	Flow	0,190*	0,093
3	Flow	Emotion	1,427***	0,298
4	Conséquence de l'expérience	Adoption de la technologie	-0,158**	0,054
4	Conséquence de l'expérience	Jugement	-0,092*	0,044
<i>Relations ajoutées</i>				
	Compétence	Conséquence de l'expérience	-0,694***	0,208
	Compétence	Utilisabilité	0,328***	0,078
	Conséquence de l'expérience	Emotion	-0,283***	0,061
	Engagement	Immersion	0,924***	0,154
	Engagement	Adoption de la technologie	0,147*	0,074
	Flow	Adoption de la technologie	0,288*	0,128
	Présence	Emotion	0,791***	0,237
	Présence	Jugement	1,128***	0,293
	Utilisabilité	Adoption de la technologie	0,430***	0,130

Cependant, les indices de qualité de l'ajustement du modèle modifié (Tableau 46) indiquent une légère amélioration des valeurs de CFI (i.e., 0,546) et de NFI (i.e., 0,395) mais celles-ci restent en dessous du seuil inférieur des valeurs recommandées qui est de 0,90. En outre la valeur du RMSEA présente également une légère amélioration (i.e., 0,085) mais elle dépasse tout de même la limite supérieure de la valeur recommandée qui est de 0,08. Seule la valeur de  $\chi^2/df$  (i.e., 2,083) indique une correspondance avec la valeur recommandée (i.e. < 5). Un seul indice de la qualité d'ajustement (i.e.,  $\chi^2/df$ ) indique une correspondance avec la valeur recommandée pour ce modèle modifié. Ce dernier reste donc faiblement acceptable.



**Figure 31. Représentation du modèle modifié IVEM avec les 7 relations d'origines et les 9 relations ajoutées**

**Tableau 46. Indices de qualité d'ajustement pour le modèle structurel et le modèle modifié**

	$\chi^2/df$	CFI	NFI	RMSEA
Modèle structurel	2,098	0,539	0,390	0,086
Modèle modifié	2,083	0,546	0,395	0,085
Seuil d'indice de qualité de l'ajustement	< 5	> 0,9	> 0,9	< 0,08

*Note.* CFI : Indice comparatif de l'ajustement ; NFI : Indice de l'ajustement normalisé ; RMSEA : Erreur quadratique moyenne de l'approximation ;  $\chi^2/df$  : Ratio entre Chi<sup>2</sup> et le degré de liberté

Les analyses des modèles structurel et modifié indiquent une faible acceptabilité. Néanmoins, le modèle modifié présente une légère amélioration des indices de qualité de l'ajustement. Par ailleurs, la structure des relations du modèle modifié est statistiquement significative. Le modèle modifié permet d'entièrement valider 4 hypothèses et de partiellement valider 3 hypothèses suggérées dans le modèle théorique de base.

## 8. Discussion de l'étude

Pour répondre au premier objectif de ces travaux qui était de proposer et de valider un modèle de l'UX pour les EVI, nous avons tout d'abord construit notre modèle sur la base de la littérature. Nous avons ensuite exploré l'effet de cinq facteurs d'influence (i.e., la largeur du champ visuel, la fréquence d'image, le niveau d'interactivité, le feedback du contenu 3D, l'expérience précédente des technologies 3D) sur l'UX subjective (i.e., présence, immersion, engagement, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie) et sur l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint, score total, temps de réalisation de la tâche, nombre d'erreur) à travers dix hypothèses éprouvées *via* 5 expérimentations. Nous avons ensuite exploré l'interdépendance des composants de notre modèle à travers quatre hypothèses. Afin de montrer l'intérêt de nos résultats, nous discutons ci-après nos hypothèses au regard de la littérature scientifique.

La première hypothèse de cette étude suggérait qu'un large champ visuel de l'EVI, impactait l'UX subjective de manière positive. Cette hypothèse n'est pas validée puisque nous n'avons observé aucune différence significative de l'UX subjective pour les valeurs de largeur du champ visuel (i.e., 106° ou 32°).

La deuxième hypothèse de cette étude supposait qu'un large champ visuel de l'EVI impactait l'utilisabilité objective de manière positive. Elle est validée puisque notre analyse révèle que le niveau atteint est positivement impacté par un large champ de vision. L'impact de la largeur du champ visuel sur l'utilisabilité objective a également été démontré par Polys et al. (2005). Ils ont notamment exploré l'effet de la largeur du champ visuel sur le temps de réalisation de la tâche et le taux de réalisation de la tâche de recherche et de comparaison.

La troisième hypothèse de cette étude stipulait qu'une fréquence d'image élevée de l'EVI, impactait l'UX subjective de manière positive. Cette hypothèse est validée puisque notre analyse révèle que l'engagement et l'émotion sont positivement impactés par la fréquence d'image (i.e., 70FPS ou 30FPS). Néanmoins, même si plusieurs auteurs font référence à l'effet que peut provoquer un problème de calcul d'image (fréquence d'image basse) sur la motivation de l'utilisateur (i.e., perte de motivation) (Thouvenin, 2009), sur son UX (Satyanarayanan et al., 2009) ou sur ses performances (Chen & Thropp, 2007), aucune étude à notre connaissance n'explore spécifiquement l'impact de la fréquence d'image sur l'engagement et l'émotion.

La quatrième hypothèse de cette étude suggérait qu'une fréquence d'image élevée de l'EVI impactait l'utilisabilité objective de manière positive. Elle est validée puisque notre analyse révèle que le niveau atteint et le score total sont positivement impactés par une fréquence d'image plus élevée. L'effet de la fréquence d'image sur l'utilisabilité objective a été confirmé par Richard et al. (1996). Ils ont spécifiquement exploré l'effet de la fréquence d'image sur le temps nécessaire pour atteindre une cible (i.e., un objet virtuel) en mouvement dans un EVI.

La cinquième hypothèse de cette étude supposait que la présence de feedback du contenu 3D de l'EVI impactait l'UX subjective de manière positive. Cette hypothèse n'est pas validée puisque nous n'avons observé aucune différence significative de l'UX subjective pour les valeurs de feedback de contenu 3D (i.e., présence de plan réduit de l'EVI ou absence de plan réduit de l'EVI).

La sixième hypothèse de cette étude stipulait que la présence de feedback du contenu 3D de l'EVI impactait l'utilisabilité objective de manière positive. Cette hypothèse n'est pas validée puisque nous n'avons observé aucune différence significative de l'utilisabilité objective pour les valeurs de feedback de contenu 3D (i.e., présence de plan réduit de l'EVI ou absence de plan réduit de l'EVI).

La septième hypothèse de cette étude supposait qu'un niveau d'interactivité élevé de l'EVI, impactait l'UX subjective de manière positive. Cette hypothèse est validée puisque le résultat montre qu'un niveau d'interactivité positif impactait certains composants de l'UX (i.e., présence, engagement, flow, immersion, compétence, jugement, adoption de la technologie) de manière positive. En effet, notre analyse montre que le niveau d'interactivité impacte positivement la présence. Ce constat concorde avec d'autres études qui démontrent un impact positif du niveau d'interactivité sur la présence (Von Der Pütten et al., 2012 ; Hawkins et al., 2010 ; Welch et al., 1996). Notre analyse révèle également que le niveau d'interactivité impacte l'engagement. L'importance d'une participation active de l'utilisateur pour une expérience engageante est un constat qui semble être partagé par plusieurs autres études (Wu et al., 2009 ; Ermi & Mäyrä, 2005 ; Kato et al., 2000). Comme dans notre analyse, d'autres études dans le domaine des environnements virtuels (Cheng et al., 2014 ; Hoffman & Novak, 2009 ; Chang & Wang, 2008) confirment l'impact du niveau d'interactivité sur le flow. Les résultats montrent par ailleurs l'impact du niveau d'interactivité sur les compétences. En effet, ces relations sont confirmées par Cheng et al. (2014) qui s'intéressent à l'impact de l'interactivité sur les compétences,

cette relation est appuyée par Pfitzner et al. (2003) qui proposent de tenir compte, pour une meilleure interaction, des différents niveaux de compétence des utilisateurs lors de la conception de technique d'interaction. Nos résultats montrent l'impact du niveau d'interactivité sur le jugement et l'adoption de la technologie. Plusieurs études montrent de l'intérêt pour ces relations notamment dans le domaine du web (Hart, Sutcliffe, & De Angeli, 2013) et des mondes virtuels (Schlosser, 2003). Ces études cherchent à améliorer la propension à adopter des nouvelles technologies par l'utilisateur et son jugement positif en explorant l'interactivité de ces dernières. En revanche, nos résultats montrent un effet du niveau d'interactivité sur l'immersion. Même si plusieurs auteurs s'intéressent à l'interactivité et à l'immersion (Jin, 2009 ; McMahan et al., 2006), ils ont plutôt tendance à les considérer séparément en termes de facteur d'influence (i.e., niveau d'interactivité, niveau d'immersion) ou de composants caractérisant l'UX (Mütterlein, 2018).

La huitième hypothèse de cette étude stipulait qu'un niveau d'interactivité élevé de l'EVI impactait l'utilisabilité objective de manière positive. Elle est partiellement validée puisque notre analyse révèle que le niveau atteint et le score total sont impactés par le niveau d'interactivité. L'impact de l'interactivité sur l'utilisabilité est confirmé par plusieurs études traitant particulièrement de la loi de Fitts (Cabral et al., 2005 ; Fitts & Peterson, 1964) qui établit un lien entre interactivité et utilisabilité. La loi de Fitts (Fitts, 1954) est communément utilisée pour comparer différents types de dispositifs d'interaction (niveau d'interaction). Elle permet plus particulièrement de calculer les performances (temps pour atteindre une cible spécifique à l'écran) de l'utilisateur avec un certain type de dispositif d'interaction en fonction de la distance et de la taille de la cible proposé sur le périphérique d'affichage.

La neuvième hypothèse de cette étude suggérait qu'une expérience précédente avec les technologies 3D impactait l'UX subjective de manière positive. Cette hypothèse est validée puisque nous avons relevé dans nos résultats que l'expérience précédente des technologies 3D impactait la présence, les compétences et l'adoption de la technologie. Ces résultats concordent avec d'autres études qui confirment l'effet des caractéristiques distinctifs de l'utilisateur et de son expérience précédente sur l'expérience empathique et d'incarnation dont la présence est un indicateur (Shin, 2018). D'autres études confirment également que le niveau d'importance et de familiarité attribués à une technologie due à l'expérience précédente avec celle-ci contribuait à améliorer les compétences perçues par l'utilisateur (Cheng et al., 2014 ; Schrader & McCreery, 2008 ; Novak et al., 2000 ; Hammond et al., 1998). L'impact de l'expérience précédente sur l'adoption de la technologie a également été confirmé dans le domaine des EVI pour l'éducation dans l'étude de Shin et al. (2013).

La dixième hypothèse de cette étude supposait qu'une expérience précédente avec les technologies 3D impactait l'utilisabilité objective de manière positive. Cette hypothèse est validée puisque notre analyse nous a révélé l'impact de l'expérience précédente sur l'utilisabilité objective que nous avons mesurée à travers le niveau atteint, le score total, le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs. Ces résultats sont confirmés par d'autres études. Sousa Santos et al. (2009) par exemple, explorent l'effet de l'expérience précédente des jeux d'ordinateur sur le nombre de

cibles atteintes et la vitesse moyenne de l'utilisateur pour atteindre une cible dans un environnement virtuel. Plocher et al. (1999) et Clemmensen et Plocher (2007) explorent l'effet de l'expérience façonnée par la culture (i.e., mode de communication, valeur du travail, ...) sur les mesures d'utilisabilité, plus spécifiquement sur les méthodes d'évaluation les plus appropriées de l'utilisabilité psychologique (e.g., thinking aloud<sup>53</sup>).

La onzième hypothèse suggérait que les conséquences de l'expérience ressenties à un degré faible ou nul, associées à un sentiment de présence positif conduisent à un ressenti positif du degré de flow qui en retour influence de manière positive les deux premiers composants (i.e., présence et conséquence de l'expérience). Cette hypothèse est partiellement validée puisque dans le modèle modifié IVEM, nous avons plutôt montré une influence significative des conséquences de l'expérience sur le flow et une influence de ce dernier sur la présence, mais pas d'influence significative de la présence sur le flow ni du flow sur les conséquences de l'expérience. Des études, notamment dans le domaine des jeux vidéo, confirment cette influence du flow sur la présence (Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Weibel & Wissmath, 2011), en revanche nous n'avons pas trouvé d'étude explorant la relation entre conséquence de l'expérience et flow. Le modèle modifié IVEM révèle d'autres influences, par exemple celui du flow sur l'adoption de la technologie et celui des conséquences de l'expérience sur l'émotion. Des études, dans le domaine des jeux en ligne ou de l'apprentissage en ligne (i.e., e-learning), attestent l'influence du flow sur l'adoption de la technologie (Liu et al., 2009 ; Hsu & Lu, 2004), ils cherchent à prédire l'adoption d'une technologie à travers la mesure du flow. Par ailleurs, les facteurs émotionnels tels que la peur, l'anxiété ou la nervosité sont connus pour affecter les conséquences de l'expérience telles que le mal de l'EVI – semblable au mal des transports – (Uno et al., 2000).

La douzième hypothèse que nous avons proposée stipulait qu'un sentiment de présence positif conduit à un degré d'engagement et de sentiment d'immersion positif, de la même manière que ces deux derniers influencent le sentiment de présence de manière positive. Elle est également partiellement validée puisque le modèle modifié indique plutôt l'influence de l'engagement sur la présence et l'immersion, mais pas d'influence positive de la présence sur l'immersion et l'engagement ni de l'immersion sur la présence contrairement à d'autres études (Shin et al., 2013 ; McMahan, 2003 ; Blandford et al., 2001). L'influence de l'engagement sur la présence a été en effet étudiée et confirmée dans plusieurs travaux (Jarmon, 2009 ; Dow et al., 2007 ; Lin & Parker, 2007 ; McMahan, 2003). Et d'autres études dans le domaine des jeux vidéo, considèrent l'engagement comme le premier état de l'immersion (Brockmyer et al., 2009 ; Brown & Cairns, 2004). Le modèle modifié révèle d'autres influences comme par exemple celles de l'engagement sur l'adoption de la technologie, de la présence sur l'émotion et de la présence sur le jugement. Dans le domaine de l'éducation par exemple, les spécialistes explorent l'adoption de la technologie à travers l'engagement des étudiants, dans celui des jeux et environnement virtuels, ce sont les réactions émotionnelles qui sont explorées à travers le spectre du sentiment psychologique de présence (Ravaja et al., 2006 ; Västfjäll, 2003). En revanche,

---

<sup>53</sup> Penser à haute voix

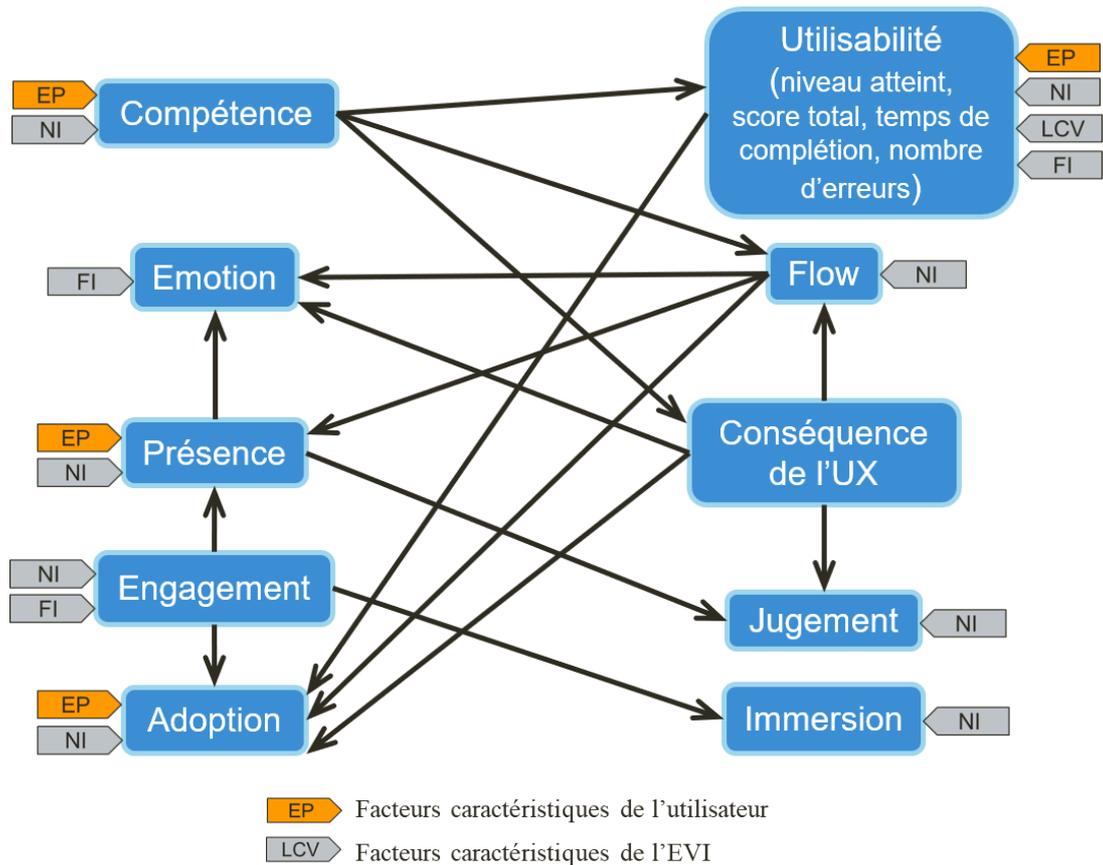
aucune étude à notre connaissance n'explore l'influence de la présence sur le jugement alors que d'après nos résultats ces deux composants sont corrélés.

La treizième hypothèse de cette étude affirmait que les compétences perçues de manière positive influencent l'état de flow positivement qui en retour influence l'utilisabilité perçue et les émotions de manière positive également. Cette hypothèse est également partiellement validée puisque nous avons plutôt montré dans notre modèle modifié que les compétences influençaient le flow qui en retour influençait l'émotion. Comme démontré par Csikszentmihalyi (1990) tout au long de ses travaux sur le flow, le flow influence fortement les émotions de l'utilisateur. Et tout comme Hoffman et Novak (2009), il démontre également que les compétences de l'utilisateur détermine fortement l'état de le flow. Le modèle modifié révèle également d'autres relations d'influence de l'utilisabilité sur l'adoption de la technologie, des compétences sur les conséquences de l'expérience et des compétences sur l'utilisabilité. Plusieurs études (Shin, Biocca, & Choo, 2013 ; Holden & Rada, 2011) confirment en effet que l'utilisabilité perçue de manière positive augmente la propension à adopter une technologie. En outre, d'autres études (Faulkner & Wick , 2005 ; Blandford et al., 2001) confirment que la perception de l'utilisabilité dépend des compétences de l'utilisateur. En revanche, aucune étude à notre connaissance, n'explore l'influence des compétences perçues sur les conséquences de l'expérience alors que d'après nos résultats ces deux composants sont corrélés.

La quatorzième hypothèse que nous avons suggérée indique que les conséquences de l'expérience perçues négativement (i.e., présence de symptômes) influencent le jugement global et la propension à adopter la technologie des EVI de manière négative. Cette hypothèse est entièrement validée par notre modèle modifié. Néanmoins, même si pour Malhke (2008) les conséquences de l'expérience sont déterminées par le jugement global et les comportements de l'utilisateur post-utilisation (i.e., choix d'alternatives, adoption de la technologie), aucune autre étude ne démontre explicitement ce résultat.

Finalement, l'UX subjective et l'utilisabilité objective de notre modèle sont impactées par des facteurs caractéristiques de l'EVI et de l'utilisateur. Nos résultats révèlent toutefois un impact plus important du niveau d'interactivité et de l'expérience précédente avec les technologies 3D sur les composants de l'UX. Ces effets sont confirmés par la littérature scientifique. Par ailleurs, notre modèle modifié (Figure 32. MODELE IVEM FINAL APRES ANALYSE DE L'INTERDEPENDANCE DES COMPOSANTS DE L'UX ET DE L'EFFET DE FACTEURS D'INFLUENCE SUR L'UX

EP : Expérience précédente avec les technologies 3D ; NI : Niveau d'interactivité ; LCV : Largeur du champ visuel ; FI : Fréquence d'image) propose des relations d'influence déjà étudiées dans d'autres travaux, mais il révèle des nouvelles relations d'influence (i.e., l'influence des conséquences de l'expérience sur le flow, de la présence sur le jugement global, des compétences sur les conséquences de l'expérience) jusqu'alors non encore étudiés à notre connaissance.



**Figure 32. Modèle IVEM final après analyse de l'interdépendance des composants de l'UX et de l'effet de facteurs d'influence sur l'UX**

EP : Expérience précédente avec les technologies 3D ; NI : Niveau d'interactivité ; LCV : Largeur du champ visuel ; FI : Fréquence d'image

## 9. Limites de l'étude

Bien qu'ayant obtenu des résultats encourageants en ce qui concerne la validation de notre modèle IVEM, cette étude comporte des limites. C'est pourquoi nos résultats doivent être relativisés en regard de certaines précautions.

L'une des limites les plus significatives est le manque de données sur la taille minimum d'échantillon de modèles complexes concernant l'analyse MES. En effet, l'analyse de notre modèle peut être qualifiée de complexe puisque le modèle comporte 179 variables, 256 paramètres à estimer et un degré de liberté de 3064<sup>54</sup>, compte tenu de l'analyse MES. Aucune donnée concernant la taille d'échantillon de ce type de modèle n'a pu être trouvée. Si la taille d'échantillon n'augmente pas forcément avec la complexité du modèle (Wolf et al., 2013), il semblerait que l'analyse MES atteigne ses limites dans le cas d'un grand nombre de variables à traiter (Marsh et al., 1988). En conséquence, notre modèle reste partiel ce qui expliquerait la faible correspondance des valeurs d'indices de la qualité d'ajustement.

<sup>54</sup> Données obtenus automatiquement via le logiciel SPSS © lors de l'analyse MES

Une deuxième limite concerne le profil de nos participants. 48% des participants rassemblent les mêmes caractéristiques (e.g., âge, sexe, domaine professionnel ou d'étude, expérience avec les technologies 3D). Ce pourcentage n'est pas une représentation de ce profil dans la population normale, c'est pourquoi nos résultats doivent être pris avec précautions. Les dispositifs de RV sont de plus en plus utilisés par tout profil incluant également des non-technophiles. Il serait donc intéressant d'anticiper les futures utilisations et d'appliquer nos résultats à d'autres profils.

Une troisième limite concerne la spécificité de nos résultats pour un type de dispositif immersif (i.e., casque de RV de type Oculus DK2) et pour un type de contenu (i.e., ludo-éducatif, avec des aspects éducatifs transparents pour l'utilisateur). Nos résultats excluent d'office les autres types de dispositifs immersifs et de contenus. Ce cadre méthodologique spécifique limite de fait la portée de nos résultats à d'autres domaines et à d'autres dispositifs.

## **10. Conclusion et perspective**

L'objectif de cette étude était de proposer puis de valider un modèle d'UX pour les EVI (IVEM) proposé sur la base de la littérature scientifique. Les données de l'UX subjective et de l'utilisabilité objective ont été recueillies au moyen du questionnaire IVEQ et des traces de performance de l'utilisateur. Nous avons étudié les scores aux échelles et les logs, pour évaluer l'effet de cinq facteurs d'influence sur les multiples composants, mais aussi pour évaluer la structure des relations entre ces composants.

Une analyse de la significativité des valeurs nous a permis de déterminer l'effet du niveau d'interactivité, de la fréquence d'image, de la largeur du champ visuel, du feedback du contenu 3D et de l'expérience précédente sur l'UX. Il en ressort que le niveau d'interactivité a un effet sur sept composants de l'UX subjective et sur deux métriques de l'utilisabilité objective. En effet, la présence, l'engagement, le flow, les compétences, l'immersion, le jugement, l'adoption de la technologie, le niveau atteint et le score total sont significativement plus élevés lorsque l'utilisateur a un niveau d'interactivité plus élevé (i.e., manette). L'expérience précédente a un effet sur trois composants de l'UX subjective et sur tous les métriques de l'utilisabilité objective. En effet, la présence, les compétences, l'adoption de la technologie, le niveau atteint et le score total sont significativement plus élevés lorsque l'utilisateur a une expérience précédente avec les technologies 3D. Le temps de réalisation de la tâche et le nombre d'erreurs sont, quant à eux, significativement réduits lorsque l'utilisateur a une expérience précédente avec les technologies 3D. La fréquence d'image a un effet sur deux composants de l'UX subjective et sur deux métriques de l'utilisabilité objective puisque le degré d'engagement, l'émotion positive, le niveau atteint et le score total sont significativement plus élevés lorsque l'application propose une meilleure fréquence d'image (i.e., 70FPS). La largeur du champ visuel a, quant à elle, un effet sur le niveau atteint puisque ce dernier est significativement plus élevé lorsque la largeur du champ visuel est plus grande (i.e., 106°). À partir de ces résultats nous pouvons proposer des recommandations aux praticiens :

- Utiliser des techniques d'interaction telles que les manettes qui procurent davantage d'interactivité améliorerait l'UX subjective (i.e., présence, engagement, flow, immersion, compétence, jugement et adoption de la technologie) et l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint et score total).
- Concevoir l'EVI en fonction de l'expérience précédente avec les technologies 3D des participants (i.e., distinction expert/novice, importance accordée à son rôle) améliorerait leur sentiment de présence, leurs compétences perçues, leur propension à adopter la technologie des EVI et l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint, score total, temps de réalisation de la tâche, nombre d'erreurs).
- Utiliser les fréquences d'image les plus élevées possible (e.g., 70FPS) engendreraient des émotions davantage positives et un meilleur degré d'engagement ainsi qu'une amélioration de l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint, score total).
- Utiliser un champ de vision large (e.g., 106°) améliorerait également l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint, score total).

Par la suite, grâce aux données recueillies, une analyse MES nous a conduit à modifier la structure des relations des composants de l'UX de notre modèle. Ce modèle IVEM modifié établit que le flow et l'engagement influencent la présence ; les conséquences de l'expérience et les compétences influencent le flow ; la présence, le flow et les conséquences de l'expérience influencent l'émotion ; l'engagement influence l'immersion ; les compétences influencent le flow, les conséquences de l'expérience et l'utilisabilité ; la présence et les conséquences de l'expérience influencent le jugement ; le flow, les conséquences de l'expérience, l'engagement et l'utilisabilité influencent l'adoption de la technologie.

Ce processus de validation contribue à la recherche sur l'UX des EVI en aboutissant à la proposition d'un modèle IVEM dont les relations sont statistiquement valides. Toutefois, nous avons vu que ce protocole expérimental est partiel de par les limites de l'étude que nous avons énoncées précédemment (voir section 9 de ce chapitre).

Ce cadre méthodologique peut être étendu et amélioré de différentes manières encore. Notre modèle peut également être évalué dans d'autres domaines, par exemple, thérapeutique, de la formation, industriel, de la conception ou collaboratif. Il peut aussi être utilisé pour l'évaluation d'autres dispositifs de RV tels qu'un simulateur virtuel à 4 ou 6 axes, un CAVE à 3, 4 ou 6 murs, un Z-space, un écran large stéréoscopique, etc. Dans un second temps, les données recueillies mettraient en évidence les structures relationnelles de notre modèle IVEM les plus pertinentes selon le domaine ou dispositif. Ces résultats nous permettraient de tendre vers un modèle holistique de l'UX pour tous les EVI.



## CHAPITRE VII. APPLICATION DU QUESTIONNAIRE POUR L'EVALUATION DE DEUX PERIPHERIQUES IMMERSIFS<sup>55</sup>

---

<sup>55</sup> Ce chapitre a fait l'objet d'un article de conférence internationale : "Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2017). Effects on User Experience in an Edutainment Virtual Environment: Comparison Between CAVE and HMD. In *Proceedings of ACM European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE 2017)*. Umeå, Sweden: ACM."



## 1. Introduction

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'évaluation de l'UX pour assister la conception d'une application ludo-éducative de RV.

Les applications ludo-éducatives font de plus en plus partie de l'environnement éducatif ou récréatif (Muratet, Torguet, Viallet, & Jessel, 2011). Afin de rendre ces applications plus attractives et efficaces au grand public, elles sont souvent combinées avec des technologies immersives de réalité virtuelle. En effet, le marché des casques de RV n'a jamais été aussi large et compétitif avec des technologies comme le HTC Vive de HTC, l'Oculus Rift d'Oculus VR, le Playstation VR de Sony ou le Samsung Gear de Samsung. Les casques de nouvelle génération promettent encore de meilleures capacités. Ces dispositifs impliquent les émotions, les affects, les compétences, les connaissances et autres aspects cognitifs de l'utilisateur qui influencent son expérience utilisateur (UX). Plusieurs études proposent des méthodes de mesures de l'UX subjectives ou objectives (Sagardia & Hulin, 2017 ; McMahan et al., 2012). Bien que les mesures objectives tendent à être plus fiables, les mesures subjectives peuvent l'être tout autant si elles sont bien définies afin d'éviter les nombreux biais qui y sont liés (Aranda et al., 2014). Cependant, chacune des deux types de mesures se complètent en apportant différentes compréhensions de l'UX.

Aujourd'hui, de nombreuses entreprises dans le domaine de la conception d'applications sont intéressées par la conception basée sur l'expérience des utilisateurs et les méthodes de conception centrées utilisateurs (Vredenburg et al., 2002). Malgré cet intérêt, les méthodes d'UX ne sont pas correctement appliquées par les praticiens (Ardito et al., 2014). Pourtant, les questionnaires d'UX sont clés en main pour aider le praticien dans la conception de systèmes interactifs. Ils présentent également l'avantage de pouvoir être utilisés dans les phases préliminaires de la conception : dès le premier prototype, un test utilisateur d'UX peut être effectué afin que les améliorations apportées favorisent une meilleure UX dans le système interactif final. Le test utilisateur est « une véritable mise en situation qui vise à étudier les comportements des utilisateurs (représentatifs de la population cible du produit en question) face à l'interface » (Baccino et al., 2005, p. 120). Un autre usage des questionnaires UX, dans le domaine de la RV, serait d'évaluer si les technologies immersives ou techniques d'interaction sont adaptés à l'application en cours de développement en termes d'UX.

C'est ce dernier usage que nous appliquons dans cette étude expérimentale à travers la problématique de l'entreprise EON Reality, un des leaders mondiaux dans l'édition d'applications ludo-éducatives : quel est le meilleur périphérique entre un CAVE et un casque de RV mobile VRONE pour utiliser une application nommée « King Tut VR2 ». Ces deux types de technologies immersives (i.e., CAVE et casque de RV), sont les technologies les plus communément utilisées dans le domaine de la RV.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons voulu mesurer l'UX de l'application « King Tut VR2 » à la fois avec un CAVE et avec un casque mobile VRONE dans le but de comparer les résultats en termes d'UX.

## 2. Objectif de l'étude et hypothèses

L'objectif de cette étude est de proposer une application concrète de notre questionnaire IVEQ dans le cadre de la comparaison de l'UX de deux dispositifs immersifs (i.e., CAVE, Casque VR ONE) associés à un EVI ludo-éducatif développé par un éditeur d'applications immersives. Cet EVI ludo-éducatif se nomme King Tut VR2, son objectif est de permettre à l'utilisateur de découvrir l'événement historique de la découverte du tombeau du pharaon Toutankamon par l'archéologue Howard Carter d'une manière à la fois ludique et éducative.

S'il y a quelques années le CAVE semblait apporter à l'utilisateur un meilleur sentiment de présence, d'immersion et d'émotions positives (Krijn et al., 2004) comparé au casque de RV, aujourd'hui les ressenties positifs des utilisateurs semblent être davantage réparties de manière équilibrée entre les deux dispositifs immersifs (Philpot et al., 2017). En revanche une meilleure perception des compétences et moins de conséquences de l'expérience (Polcar & Horejsi, 2013) sont davantage perçus dans les CAVE comparé aux casques de RV. En conséquence, nous proposons une première hypothèse qui stipule que l'UX subjective du CAVE est supérieure à celle du casque de RV mobile (H1). Pour valider ou invalider cette hypothèse, nous avons mesuré l'UX subjective (i.e., présence, engagement, immersion, flow, compétence, émotion, conséquence de l'expérience, jugement, adoption de la technologie) à l'aide de notre questionnaire IVEQ validé dans le CAVE et dans le casque de RV mobile VRONE.

La plupart des concepteurs d'EVI implémentent des techniques d'interaction et associent leurs applications à des dispositifs sans méthode spécifique. Cela donne lieu à des applications qui présentent souvent des interfaces problématiques pour les utilisateurs (Kjeldskov, 2001). En effet, il n'y a actuellement pas de techniques d'interaction spécifiques utilisées et recommandées pour les casques de RV mobile. Par ailleurs, nous avons constaté que la sensibilité des capteurs de mouvements semble être une des problématiques les plus critiques susceptible d'empêcher une interaction fiable avec un casque mobile de RV (Hürst & Helder, 2011). Par conséquent, notre hypothèse 2 suggère que la technique d'interaction du CAVE (i.e., rayon virtuel) permet une interaction plus rapide que celle du casque de RV mobile (i.e., viseur) (H2). Une métrique de l'utilisabilité objective est utilisée pour éprouver cette hypothèse, il s'agit du temps de réalisation de la tâche dans le scénario de l'application King Tut VR2 pour les deux dispositifs immersifs.

Dans notre 3ème hypothèse, nous stipulons que l'aspect pédagogique de l'EVI ludo-éducatif King Tut VR2 est conçu de manière à impacter les connaissances de l'utilisateur sur Howard Carter et sa découverte du tombeau du pharaon Toutankamon (H3). Les résultats des pré- et post-questionnaires de connaissances ont été utilisés pour valider ou invalider cette hypothèse.

### 3. Participants

21 participants (2 femmes et 19 hommes) entre 18 et 43 ans ( $M = 26,1$  ans ;  $ET = 7,38$  ;  $Min = 18$  ans ;  $Max = 43$  ans) ont pris part à cette étude. Treize participants travaillent ou étudient dans le domaine des TIC et dans le domaine de l'informatique (e.g., communication et infographie, web et multimédia, programmation, recherche en RV, administration réseaux, chef de projet). Huit participants travaillent ou étudient dans d'autres domaines tels que l'ingénierie des systèmes industriels, la micro technologie, la direction commerciale, la direction de communauté, la biologie, la sociologie et l'enseignement.

L'application King Tut VR2 a été développée par l'entreprise EON Reality en anglais. La sélection des participants a été réalisée selon leur niveau d'anglais de manière à ce qu'il corresponde au niveau du scénario anglais proposé. Treize participants ont un très bon niveau de compréhension orale de l'anglais (i.e., ils ont obtenu un score de 5/5 au test d'anglais créé pour cette application), sept participants ont un bon niveau de compréhension orale de l'anglais (i.e., ils ont obtenu un score de 4/5 au test d'anglais) tandis qu'un participant a un niveau de compréhension orale de l'anglais satisfaisant (i.e., il a obtenu un score de 3/5 au test d'anglais).

### 4. Procédure

Cette expérimentation a eu lieu dans les locaux de l'entreprise EON Reality Laval. Chaque participant s'est présenté séparément dans la salle d'expérimentation et a suivi trois étapes :

Durant la première étape de l'expérimentation, les participants s'asseyaient devant un bureau, puis passaient deux tests. Le premier était le test d'anglais. Seules les données des participants ayant obtenu un score supérieur ou égale à 3/5 ont été prises en compte. Le second test était un test de connaissance sur Howard Carter et la découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon. Les participants ont rempli ce test deux fois : au début et en fin d'expérimentation.

Après ces tests, une introduction de l'expérimentation est présentée par l'expérimentateur. L'ordre des deux étapes suivantes a été contrebalancé. Par exemple, une session « 1<sup>er</sup>/casque de RV mobile – 2<sup>nd</sup>/CAVE » a été suivie d'une session « 1<sup>er</sup>/CAVE – 2<sup>nd</sup>/casque de RV mobile » pour le participant suivant. Durant la deuxième étape de l'expérimentation, des indications d'utilisation de la première technologie (**ANNEXE 7 : INDICATIONS SUR LA MANETTE DU CAVE**) et de son interaction étaient données aux participants par l'expérimentateur. Par exemple, s'il s'agissait du casque de RV mobile, chaque participant se tenait debout et devait porter le casque de RV mobile VRONE. Une fois l'application King Tut VR2 lancée, l'expérimentateur glissait le téléphone portable dans l'espace dédié du casque de RV. Les participants suivaient ensuite les instructions données dans l'application jusqu'à la fin du scénario. À la fin de cette session, les participants devaient compléter le questionnaire d'UX IVEQ.

Durant la troisième étape de l'expérimentation, des indications d'utilisation de la deuxième technologie (**ANNEXE 8 : INDICATIONS SUR LE CASQUE DE RV MOBILE**) et de son interaction étaient données aux participants par l'expérimentateur. Par exemple, s'il s'agissait du CAVE, chaque participant se tenait debout au milieu du CAVE de EON Reality : l'iCube (Figure 33. PARTICIPANT DANS LE CAVE (iCUBE) UTILISANT L'APPLICATION KING TUT VR2) et il devait porter des lunettes stéréoscopiques et une manette. Une fois l'application du CAVE King Tut VR2 lancée, les participants suivaient les instructions données dans l'application jusqu'à la fin du scénario. À la fin de cette session, les participants complétaient pour la deuxième fois le questionnaire d'UX IVEQ. Ils complétaient également pour la deuxième fois le test de connaissances. Les participants étaient ensuite remerciés pour leur participation. Chaque participant passait entre 45 minutes et une heure dans les locaux de l'entreprise.



**Figure 33. Participant dans le CAVE (iCube) utilisant l'application King Tut VR2**

## **5. Tâches réalisées**

La tâche consistait à utiliser l'application King Tut VR2 qui permettait de revivre le voyage de l'archéologue anglais Howard Carter (1874-1939) lors de sa découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon dans la vallée des Rois en 1922. Les participants devaient suivre les instructions données par la voix off de l'application. Les tâches couvraient des activités passives (e.g. observation et écoute du l'itinéraire du voyage de Howard Carter) et des activités actives (e.g., fouille du sol avec une pioche) (Figure 34. CAPTURE D'ECRAN DE L'APPLICATION KING TUT VR2 DANS LE CASQUE DE RV MOBILE).



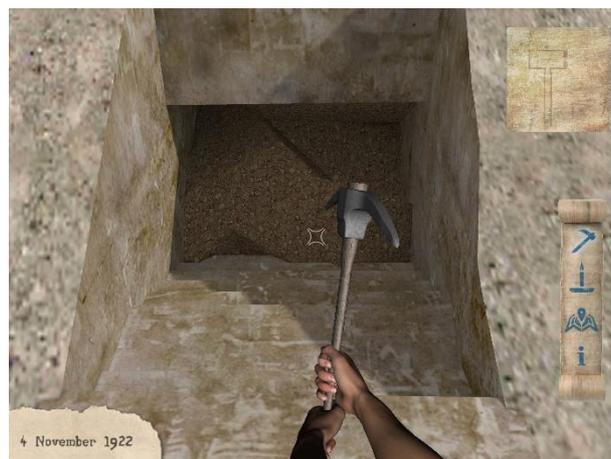
**Figure 34. Capture d'écran de l'application King Tut VR2 dans le casque de RV mobile**

## **6. Matériel et mesures**

### **6.1 Application ludo-éducative King Tut VR 2**

L'application King Tut VR 2 (Figure 35) a été développée par un développeur de l'entreprise EON Reality en collaboration avec le Dr. Fathi Saleh, Conseiller spécial patrimoine du 1er Ministre Egyptien.

Cette application permet aux participants d'assimiler des connaissances relatives à l'Égypte antique dans une contexte ludique. L'application est décomposée en plusieurs *scenarii* durant lesquels le participant est passif et observateur et d'autres *scenarii* durant lesquels il est actif et interagit dans l'EVI.



**Figure 35. Capture d'écran de l'application King Tut VR 2 vue sur tablette**

## 6.2 Périphériques immersifs

Chaque participant utilisait l'application King Tut VR2 à deux reprises : une fois avec un périphérique immersif, puis avec le second périphérique immersif :

- un casque de RV mobile VRONE utilisé avec un téléphone portable Samsung Galaxy S6 (FIGURE 36). Le son de l'application provenait des hauts parleurs du téléphone. Les participants pouvaient interagir dans l'application avec des mouvements de tête grâce auxquels ils dirigeaient un viseur au centre de leur champ de vision sur la zone interactive désirée.



**Figure 36. Casque de RV mobile VRONE**

- un CAVE EON iCube composé de quatre murs de projection (en position avant, droite, gauche et au sol) qui délimitent un espace immersif d'environ trois mètres sur trois (FIGURE 37). Un projecteur est positionné en face de chaque mur et affiche une partie du contenu graphique de l'EVI. Des capteurs de mouvements permettent de repositionner dans l'EVI les mouvements de têtes et mains du participant grâce aux marqueurs des lunettes stéréoscopiques et de la manette (FIGURE 38). Des hauts parleurs diffusaient le son par-dessus le CAVE. Les participants interagissaient dans l'application grâce à un rayon virtuel continu partant de la manette et visant la zone désirée.



**Figure 37. CAVE EON iCube à quatre murs de projection**

### 6.3 Questionnaire d'identification

Un questionnaire d'identification a été utilisé pour recueillir les informations personnelles des participants telles que le nom, le prénom, la date de naissance, le sexe, le dernier diplôme et le diplôme en cours ou la profession. Un test d'anglais y a été associé pour vérifier le niveau de compréhension orale des participants en anglais.



**Figure 38. Manette pour l'iCube avec les marqueurs réfléchissants**

Le test consiste en la diffusion d'un enregistrement audio en anglais qui décrit cinq situations suivies d'une question. Le participant choisit ensuite la bonne réponse parmi trois propositions (e.g., 1. *Before the excavation begins, archeologists write a*

research design. When is the excavation research design written? a. Before the excavation; b. Before the excavation begins; c. During the excavation<sup>56</sup>).

## 6.4 Questionnaire d'UX

Notre questionnaire validé d'UX IVEQ a été utilisé pour mesurer l'UX subjective à chaque passation (cf. CHAPITRE V). Il est composé de 68 items, 3 questions ouvertes et 9 sous-échelles (i.e., présence, engagement, immersion, flow, émotion, compétence, conséquence de l'expérience, adoption de la technologie, jugement). Chaque item comporte une échelle de Likert à 10 points.

## 6.5 Test de connaissances

Le test de connaissances (cf. ANNEXE 9 : TEST DE CONNAISSANCE DE L'APPLICATION KING TUT VR2) a été utilisé avant et après chaque séance d'expérimentation pour recueillir la quantité d'informations que le participant aurait retenues grâce à la visualisation du scénario de l'application. Ce test consiste en cinq questions en anglais sur Howard Carter et sa découverte. Les participants choisissaient la bonne réponse parmi quatre propositions (e.g., 2. *Où est-ce que Howard Carter commence-t-il sa fouille ? a. À Londres ; b. Au milieu de la vallée des rois ; c. Dans les fonds marins du Nil ; d. Je ne sais pas*). Ce test était en anglais afin de ne pas perturber les participants avec la traduction.

# 7. Données collectées et analyse

## 7.1 Comparaison de l'UX subjective entre le casque de RV et le CAVE

Dans cette expérimentation, chacun des 21 participants testait les deux périphériques immersifs, et remplissait le questionnaire d'UX IVEQ à deux reprises au cours de sa passation, à chaque fois à la suite de l'utilisation d'un périphérique. Pour comparer l'UX associée à chaque dispositif, nous avons réalisé une analyse statistique pour échantillon apparié sur les scores aux échelles du questionnaire d'UX. Le test de normalité indiquait une différence non significative ( $p > 0,05$ ) des résultats appariés pour chaque sous-échelle suggérant la validation de l'hypothèse de normalité du groupe expérimental. Nous avons pu ainsi choisir de faire un test de Student pour échantillon apparié pour réaliser notre analyse.

---

<sup>56</sup> Traduction : 1. Avant que la fouille ne commence, les archéologues écrivent un plan de fouille. Quand est-ce que le plan de fouille était écrit ? a. Avant la fouille ; b. Avant que la fouille ne commence ; c. Durant la fouille.

## 7.2 Temps de réalisation de la tâche avec le casque de RV et le CAVE

Le temps moyen de réalisation de la tâche dans le scénario de l'application a été mesuré pour comparer les performances des participants avec chaque périphérique. Nous avons considéré le temps moyen de réalisation de la tâche comme un métrique de l'utilisabilité objective. Cependant, les métriques de l'utilisabilité objective ne sont pas limitées au temps moyen de réalisation de la tâche. Le taux de réalisation de la tâche, le nombre moyen d'erreurs, le temps moyen de corrections de l'erreur, etc. en sont également d'autres. Dans le contexte de notre expérimentation, le temps moyen de réalisation de la tâche suffisait : nous avons chronométré les participants du début du scénario jusqu'à la fin. Un temps d'interaction peu élevé comparé à la moyenne pourrait indiquer que les participants n'avaient probablement pas rencontré de problèmes majeurs d'interaction durant leur utilisation. Pour analyser la différence entre les temps moyens avec le casque de RV et avec le CAVE, nous avons réalisé un test de Student pour échantillon apparié.

## 7.3 Test de connaissance pré- et post-passation

Les valeurs moyennes du résultat des tests de connaissances pré-passation et post-passation ont été comparées pour identifier un possible "impact" pédagogique de l'application ludo-éducative sur les participants. Il s'agissait d'analyser la différence du nombre de réponses positives du test de connaissances avant et après la réalisation de la tâche mobilisant le périphérique de réalité virtuelle. Un nombre moyen plus élevé de réponses positives ultérieurement à la réalisation de la tâche comparativement aux réponses apportées avant celle-ci indiquait que les participants semblaient avoir gagné en connaissances lors de l'utilisation de l'application. Un nombre moyen identique ou plus faible de réponses positives dans le questionnaire de connaissances post-passation en comparaison avec le questionnaire pré-passation indiquait que les participants n'avaient pas appris quelque chose lors de l'utilisation de l'application. Pour analyser les différences de réponses positives pré- et post-passation, nous avons utilisé un test de Student pour échantillon apparié.

## 8. Résultats

Les analyses statistiques sont détaillées ci-dessous. Elles décrivent non seulement les résultats moyens des scores du questionnaire d'UX pour le casque de RV et le CAVE, mais aussi les résultats moyens du temps de réalisation de la tâche dans le scénario et les données provenant des tests de connaissances pré- et post-passation pour chacun de ses périphériques.

## 8.1 Comparaison de l'UX subjective entre le casque de RV et le CAVE

Les résultats relatifs à l'UX subjective sont présentés dans le Tableau 47. Ils indiquent une différence significative entre les deux périphériques pour six composants de l'UX (i.e., présence, engagement, flow, compétence, jugement, conséquence de l'expérience). Le sentiment de présence de l'utilisateur dans le CAVE ( $M = 7,40$  ;  $ET = 0,91$ ) est plus élevé comparé au sentiment de présence avec le casque de RV mobile ( $M = 6,08$  ;  $SD = 1,35$ ) ;  $t(20) = 4,45$  ;  $p < 0,001$ . L'engagement de l'utilisateur est plus élevé dans le CAVE ( $M = 7,59$  ;  $ET = 1,52$ ) comparé à l'engagement ressenti avec le casque de RV mobile ( $M = 6,30$  ;  $ET = 1,70$ ) ;  $t(20) = 2,84$  ;  $p = 0,010$ . L'état de flow de l'utilisateur est plus élevé dans le CAVE ( $M = 7,27$  ;  $ET = 1,36$ ) comparé à l'état de flow avec le casque de RV mobile ( $M = 5,87$  ;  $SD = 1,63$ ) ;  $t(20) = 3,49$  ;  $p = 0,002$ . Les compétences perçues de l'utilisateur sont plus élevées dans le CAVE ( $M = 8,44$  ;  $ET = 1,10$ ) comparées aux compétences perçues avec le casque de RV mobile ( $M = 7,41$  ;  $ET = 1,29$ ) group ;  $t(20) = 3,48$  ;  $p = 0,002$ . Le jugement de l'utilisateur associé au CAVE ( $M = 8,27$  ;  $ET = 1,01$ ) est plus positif comparé au jugement associé au casque de RV mobile ( $M = 6,86$  ;  $ET = 1,28$ ) ;  $t(20) = 6,07$  ;  $p < 0,001$ .

Les conséquences de l'expérience sont moins élevées dans le CAVE ( $M = 2,18$  ;  $ET = 1,15$ ) comparées aux conséquences de l'expérience ressenties avec le casque de RV mobile ( $M = 4,02$  ;  $ET = 1,75$ ) ;  $t(20) = -5,68$  ;  $p < 0,001$ .

**Tableau 47. Moyenne, écart type, valeur de t et p des composants l'UX subjective pour le casque de RV et le CAVE**

Sous-échelle	Périphérique	Moyenne	Ecart-type	Valeur de t	p
Présence	CAVE	7,40	0,91	4,45	0,000*
	Casque RVM	6,07	1,35		
Engagement	CAVE	7,58	1,52	2,84	0,010*
	Casque RVM	6,30	1,70		
Immersion	CAVE	5,82	1,70	2,04	0,055
	Casque RVM	4,90	1,70		
Flow	CAVE	7,26	1,36	3,49	0,002*
	Casque RVM	5,87	1,63		
Emotion	CAVE	4,25	0,98	1,67	0,111
	Casque RVM	3,96	0,86		
Compétence	CAVE	8,43	1,10	3,48	0,002*
	Casque RVM	7,41	1,29		
Jugement	CAVE	8,27	1,01	6,07	0,000*
	Casque RVM	6,86	1,27		
Conséquence de l'expérience	CAVE	2,18	1,15	5,68	0,000*
	Casque RVM	4,02	1,74		
Adoption de la technologie	CAVE	7,39	0,81	1,70	0,105
	Casque RVM	7,15	0,87		

*Note.* \* $p \leq 0,05$  ; CAVE = Cave Automatic Virtual Environment; RVM = Réalité Virtuelle Mobile

Cependant, aucune différence significative n'a été observée pour trois autres composants de l'UX subjective : l'immersion, l'émotion, l'adoption de la technologie.

## 8.2 Temps de réalisation de la tâche avec le casque de RV et le CAVE

Avec une différence de temps de réalisation de la tâche de 67,43 secondes, le CAVE (M = 657,10 ; ET = 60,98) semble être plus facile à utiliser que le casque de RV mobile (M = 724,52 ; ET = 160,51) ;  $t(20) = 1,67$  ;  $p = 0,111$ .

En effet, 11 participants soulignent comme point négatif de leur expérience le fait d'avoir eu des difficultés à viser correctement une zone précise avec le viseur du casque de RV mobile (e.g., participant n°10 : « *l'interaction avec le viseur n'était pas assez précise et ce dernier tremblait* »). Cependant, aucune différence significative n'a été observée pour ce résultat (Tableau 48).

**Tableau 48. Moyenne et écart-type du temps de réalisation de la tâche dans le scénario King Tut VR2 pour le CAVE et le casque de RV mobile**

Périphérique	Temps de réalisation moyenne de la tâche (sec.)	Ecart type
CAVE	657,10	60,98
Casque de RVM	724,52	160,51

*Note. CAVE = Cave Automatic Virtual Environment; RVM = Réalité Virtuelle Mobile*

## 8.3 Test de connaissances pré- et post-passation

L'application ludo-éducative a eu un impact pédagogique sur les participants. Nous avons observé une différence significative de 42 réponses correctes et un gain de 2 points pour le test de connaissances post-expérimental (M = 4,09 ; ET = 0,97) comparé au test de connaissance pré-expérimental (M = 2,09 ; ET = 1,19) ;  $t(20) = 6,179$  ;  $p < 0,001$  (Tableau 49). De plus, 8 participants ont indiqué comme point positif de l'expérience le fait qu'ils avaient particulièrement apprécié l'environnement pédagogique qui leur était proposé (e.g., participant n°1 : « *l'apprentissage autour de l'Égypte antique était intéressant, être au centre de l'Histoire était appréciable* »).

**Tableau 49. Nombre total de réponses correctes, moyenne et écart-type des scores obtenus au test de connaissances pré- et post-passation sur Howard Carter et la découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon**

Test de connaissance	Nombre de réponses correctes	Moyenne	Ecart- type
Pré-expérimental	44	2,09	1,19
Post-expérimental	86	4,09	0,97

## 9. Discussion

Nous avons analysé et comparé deux périphériques immersifs (i.e., Casque de RV mobile et CAVE) en termes d'UX. Cette étude diffère d'autres études pour deux raisons. Tout d'abord contrairement aux études qui s'intéressent à l'effet de plusieurs périphériques immersifs sur certains composants de l'UX (Polcar & Horejsi, 2013 ; Baus et al., 2011 ; Krijn et al., 2004), nous nous intéressons à un total de 10 composants clés de l'UX. De plus, peu d'études comparent l'effet de deux périphériques immersifs dans le domaine ludo-éducatif. En ce sens, cette étude constitue un apport dans ce domaine. Afin de montrer l'intérêt de nos résultats pour la conception d'EVI ludo-éducatifs, nous discutons ci-après nos hypothèses au regard de la littérature scientifique.

Notre première hypothèse stipulait que l'UX subjective du CAVE était supérieure à celle du casque de RV mobile. Elle est partiellement validée. En effet, les résultats de l'étude nous montrent que les participants ont de meilleures perceptions dans le CAVE comparé au casque de RV mobile avec une différence significativement pour 6 composants de l'UX (i.e., présence, engagement, flow, compétences, jugement, conséquence de l'expérience) et aucune différence significative pour 3 composants de l'UX (i.e., immersion, émotion, adoption de la technologie). Nous avons trouvé que nos résultats étaient comparables à d'autres études. Par exemple, une meilleure présence, immersion et des émotions plus positives (Krijn et al., 2004) ainsi que de meilleures compétences et moins de conséquences de l'expérience néfastes (Polcar & Horejsi, 2013) sont ressenties et perçues dans le CAVE contrairement aux casques de RV. Dans d'autres études, l'émotion ressentie (Baus et al., 2011) semble être comparable pour les deux périphériques immersifs. En revanche, aucune étude à notre connaissance ne compare le CAVE et le casque de RV en termes d'engagement, de flow, de jugement et d'adoption de la technologie. Cependant, nos résultats montrent que le CAVE est mieux considéré pour tous ces composants sauf pour l'adoption de la technologie pour lequel le résultat de comparaison entre les deux dispositifs n'est pas significatif.

Notre deuxième hypothèse suggérait que la technique d'interaction du CAVE (i.e., rayon virtuel) permettait une interaction plus rapide que celle du casque de RV mobile (i.e., viseur). Elle est infirmée puisque la différence de temps de completion du scénario (i.e., utilisabilité objective) n'est pas significative entre les deux périphériques immersifs. Toutefois, les résultats montrent que les participants tendent à passer 9,31% (67,43 secondes) de moins dans le CAVE comparé au casque de RV mobile. Ces résultats semblent être en concordance avec de précédentes études sur le temps de réalisation de la tâche dans le scénario avec le CAVE et avec le casque de RV (Krijn et al., 2004 ; Bowman et al., 2001). Ces études suggèrent que de meilleures techniques d'interaction pour les casques de RV mobile pourraient être conçues bien qu'elles représentent un défi pour les concepteurs (Hürst & Helder, Mobile 3D graphics and virtual reality interaction, 2011). L'un des obstacles parmi les plus critiques à la stabilité de l'interaction semble concerner la fiabilité et la robustesse des données produites par les bruits parasites des capteurs de mouvement du casque de RV. Par ailleurs, la plupart des concepteurs implémentent des techniques d'interaction

et attribuent leur application à des périphériques immersifs sans méthode spécifique. Cela favorise des applications de RV avec des interfaces utilisateur présentant des problématiques d'interaction (Kjeldskov, 2001).

Notre troisième hypothèse supposait que l'aspect pédagogique de l'EVI ludo-éducatif King Tut VR2 était conçue de manière à impacter les connaissances de l'utilisateur quant à Howard Carter et sa découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon. Cette hypothèse est validée. En effet, il y a une différence significative en termes de connaissances sur Howard Carter et sa découverte du tombeau du pharaon Toutankhamon avant et après l'utilisation de l'application ludo-éducative King Tut VR2. Cette dernière semble donc avoir un apport pédagogique.

Les résultats précédents suggèrent qu'il est préférable d'opter pour un périphérique de type CAVE associé à un EVI ludo-éducatif, implémenté tel que King Tut VR2, ayant un impact pédagogique avéré. Une telle association permet de percevoir un meilleur sentiment de présence, d'immersion, plus d'émotions positives, un sentiment d'être plus compétent, mais aussi de ressentir moins de conséquences de l'expérience néfastes (i.e., mal des EVI). Dans notre étude, le CAVE présentait plusieurs avantages : il procurait un champ de vision plus large, plus proche de notre champ de vision naturel alors que le champ de vision du casque de RV mobile était plus étroit ; le niveau d'interactivité était plus élevé avec la manette du CAVE comparé au niveau d'interactivité du casque de RV mobile, permettant aux participants de manipuler les objets à 360° ; le capteur de mouvement du CAVE permettait la perception de profondeur durant le mouvement d'avant et arrière et non le casque de RV mobile. En termes d'utilisabilité objective (i.e., temps de réalisation de la tâche), d'engagement, de flow, de jugement et d'adoption de la technologie, aucune préférence entre les deux périphériques immersifs associé à l'utilisation de l'application n'a été observée. Nous expliquons ce constat par le fait que les deux périphériques sont aussi efficaces l'un que l'autre pour certains composants (i.e., adoption de la technologie, utilisabilité objective, flow) ou alors que d'autres composants (i.e., jugement, engagement) dépendent peu de la technologie mais davantage du contenu de l'application.

## **10. Limites de l'étude**

La première limite de cette étude concerne le nombre de participants. Bien que nous ayons atteint le nombre minimal de participants (i.e.,  $N = 20$ ) requis pour valider nos résultats, un taux de participants plus élevé aurait probablement davantage tranché les résultats proches. Cependant, ce choix (i.e., limiter à ce nombre de participants) s'explique par le contexte final dans lequel nous projetons ce processus d'évaluation. En effet, cette évaluation pourrait être intégrée dans un processus de conception durant lequel ce sont les concepteurs (ergonomes ou informaticiens) qui la conduirait. Or, ces derniers ne disposent pas - en général - d'assez de temps pour faire passer plus d'une vingtaine de participants.

La seconde limitation concerne la dénomination de ce qui caractérise une bonne UX. À notre connaissance, aucun seuil définissant une bonne ou une mauvaise UX n'est établi dans la littérature. En conséquence, nous pouvons nous interroger sur le niveau

d'importance des composants, sur leur valeur ou « poids » les uns par rapport aux autres.

## 11. Conclusion et perspectives

Dans cette étude, nous avons mis en pratique une utilisation possible de notre questionnaire UX IVEQ éprouvé dans notre étude précédente. Il a servi de guide dans le choix du périphérique immersif (i.e., CAVE ou casque de RV mobile) qui propose la meilleure UX aux utilisateurs pour l'utilisation de l'application ludo-éducative King Tut VR2. Ce questionnaire mesure 9 composants de l'UX dans l'EVI, indiquant ainsi ses points forts et points faibles. Connaissant ces points, les praticiens peuvent faire de meilleurs choix de conception et de technologies afin de l'améliorer dès le premier prototype en repérant les points faibles à amender. Le processus de mesure de l'UX avec notre questionnaire suit quatre étapes :

- Le questionnaire d'UX IVEQ est utilisé lors d'un test utilisateur durant le processus de conception d'une application avec une technologie immersive.
- Les résultats (i.e., scores aux sous-échelles) du questionnaire nous renseignent sur le niveau de l'UX (i.e., présence, flow, engagement, ...) de l'application. Les concepteurs utiliseront ces informations pour améliorer l'application.
- Ils se focaliseront premièrement sur les recommandations d'après notre modèle (voir section 10 du CHAPITRE VI).
- Ils se focaliseront ensuite sur les recommandations issues de la littérature scientifique (voir ci-après) pour améliorer les scores les moins élevés des composants de l'UX.

Nous avons vu que le CAVE semble avoir plus d'avantages que le casque de RV mobile dans le cadre de cette étude. En effet, les CAVE semblent proposer une meilleure UX et une meilleure facilité d'interaction. De plus, concevoir des interactions pour ce type de dispositifs semble présenter moins de problématiques. Cependant, les CAVE sont coûteux et encombrants. En conséquence, des alternatives moins coûteuses et moins volumineuses sont développées (Henden et al. 2008). Ces dernières conviendraient davantage au public des applications ludo-éducatives. En dehors de la technologie, le contenu du système interactif peut être à l'origine d'une UX non optimale. C'est pourquoi, un certain nombre d'études identifient également des lignes directrices pour concevoir des systèmes interactifs qui procurent une bonne perception de l'UX. En voici quelques exemples :

- Nemery et al. (2011) proposent d'agir sur la sollicitation, la tactique d'amorçage et la responsabilité pour renforcer l'engagement de l'utilisateur.
- Stanney et al. (2003) suggèrent d'agir sur l'orientation, la navigation, la sélection et la manipulation pour améliorer l'utilisabilité.
- Ils suggèrent également d'agir sur la facilité d'interaction, le contrôle initié par l'utilisateur, le réalisme pictural, la durée d'exposition, les facteurs sociaux et du système pour améliorer la présence.

- Pour améliorer l'immersion, ils identifient l'isolation, l'inclusion, le mode naturel des interactions et du contrôle, la présence et la perception d'un « halo » de stimulus englobant et supportant les déplacements de l'utilisateur.
- Pour Lin et Parker (2007), diminuer le champ de vision (e.g., 60°), une scène visuelle non stéréoscopique, diminuer les mouvements de la scène visuelle (e.g., 0,03Hz), autoriser l'utilisateur à être dans un mode d'interaction actif et des interventions d'indices visuelles pour prévoir le déplacement à venir sont des options qui sembleraient réduire les conséquences de l'expérience (e.g., mal des EVI).

Ces lignes directrices constituent un aperçu de ce que les concepteurs peuvent intégrer dans le processus de conception des applications ludo-éducatives pour améliorer l'UX dans les EVI.



CHAPITRE VIII. DISCUSSION GENERALE : VERS  
UN MODELE HOLISTIQUE D'AIDE A LA  
CONCEPTION



## 1. Introduction

Dans le cadre de cette thèse, nous avons voulu apporter une définition et une caractérisation conceptuelle de l'UX sous la forme d'un modèle. Ce dernier prend en compte les principaux composants de l'UX dans le contexte des EVI, contrairement à de nombreux travaux du domaine couplant UX et EVI qui ne définissent l'UX qu'à travers un faible nombre de composants (Gaggioli et al., 2003 ; Riva et al., 2003). Dans un souci de transférabilité de ces recherches vers l'industrie (il s'agit d'une thèse des Arts et Métiers fortement ancrée dans l'industrie), nous avons développé un questionnaire d'UX permettant ainsi de mesurer les perceptions de l'utilisateur dans un EVI dès un stade précoce de conception (Yogasara et al., 2011). Nos études empiriques issues de ce cadre produisent des connaissances qui permettent de contribuer à l'évaluation et l'aide à la conception des EVI en termes d'UX. Concrètement, nous avons poursuivi trois objectifs : la proposition et la validation d'un modèle de l'UX pour les EVI, la construction et la validation d'un outil de mesure subjectif opérationnalisant le modèle, l'application du questionnaire et du modèle dans le cadre d'une problématique en entreprise.

## 2. Rappel et discussion des principaux concepts

Nous rappelons brièvement les principaux concepts présents dans notre manuscrit avant de les mettre en relation dans la suite de cette section. Nous avons identifié plusieurs définitions de l'UX, mais celle que nous prenons principalement en compte dans ce manuscrit est celle générique de la norme ISO 9241-210 (2009) : « *les perceptions et les réponses (physiques et psychologiques) d'une personne qui résultent de l'usage ou de l'anticipation de l'usage d'un produit, d'un système ou d'un service, ses émotions, ses croyances, ses préférences, ses comportements et ses réussites qui se présentent avant pendant ou après l'usage [...]* ». Cette définition nous donnait suffisamment de marge pour décliner notre propre définition plus spécifique aux EVI : **l'UX en EVI regroupe le sentiment d'immersion, le degré d'engagement, le sentiment de présence de l'utilisateur, ses compétences perçues, son état de flow, ses émotions, l'utilisabilité perçue, les conséquences de l'expérience ressenties, son jugement global et sa propension à adopter la technologie pendant ou juste après l'utilisation de l'EVI.**

Chacun de ses composants de l'UX (e.g., présence, immersion, flow, ...) a également plusieurs définitions. Nous avons choisi de nous arrêter sur les définitions suivantes :

- D'après Csikszentmihalyi (1990), le flow est un état durant lequel l'utilisateur ressent un haut niveau de maîtrise ou contrôle de ses compétences mais aussi beaucoup de joie et de divertissement ;
- Piolat & Bannour (2008, p. 2) définissent l'émotion comme « *une réalité psychique complexe qui implique des processus d'évaluation cognitive du flux d'informations internes ou externes à l'individu, des sensations d'excitation et plaisir (ou déplaisir) qui y sont associées, des changements physiologiques et un comportement émotif, habituellement dirigé vers un but, adaptatif* » ;

- Everaere (2000) considère que les compétences sont à l'intersection des entités individu-situation et varient quotidiennement suivant l'état de fatigue, de l'humeur, des préoccupations de l'utilisateur mais aussi en fonction de la situation dans laquelle l'activité est réalisée. Celle-ci dépend du type d'équipement utilisé, du type d'information diffusé, du type de tâche à réaliser, de l'environnement etc ;
- Nielsen (1993) définit l'utilisabilité comme les facilités d'apprentissage et d'utilisation caractérisées par l'apprenabilité, la mémorisation, l'efficacité, l'efficience et la satisfaction ;
- Pour Witmer et Singer (1998), la présence fait référence à un état subjectif et psychologique qui donne l'illusion de se sentir « réellement là » dans un environnement virtuel plutôt que réel ;
- Witmer et Singer (1998) considèrent l'immersion comme une dimension psychologique, pour eux l'immersion est l'état psychologique de se sentir immergé, enveloppé par les stimuli virtuels ;
- D'après Witmer et Singer (1998), l'engagement est le degré d'attention et d'énergie qu'une personne accorde à des stimuli, une activité ou un événement particulier dans l'EVI ;
- LaViola JR (2000) entend par « conséquences de l'expérience », un mal des environnements virtuels se traduisant concrètement par un ensemble de symptômes, comme une fatigue visuelle, une diplopie, des maux de tête, une pâleur, une transpiration, une sécheresse buccale, une sensation de ventre plein, une désorientation, des vertiges, une ataxie<sup>57</sup>, des nausées, des vomissements ;
- Barcenilla & Bastien (2009, p. 331) définissent l'adoption de la technologie comme « *le degré d'intégration et d'appropriation d'une technologie dans un contexte d'usage* » ;
- Hassenzahl (2007) et Mahlke (2002) considèrent que le jugement global se décline en un jugement d'attractivité, un jugement esthétique (i.e., beau, laid) et un jugement de valeur (i.e., bon *versus* mauvais).

Nous avons également constaté que L'UX était impactée par les facteurs d'influence comme - entre autres - les caractéristiques de l'EVI, celles de l'utilisateur et celles du contexte d'utilisation que nous avons identifiées dans plusieurs études (Cheng et al., 2014 ; Shin et al., 2013 ; Mahlke, 2008 ; Lin & Parker, 2007). Nous avons choisi dans notre première étude empirique de ne prendre en compte que certaines caractéristiques auxquelles nous pouvions avoir accès. Les caractéristiques techniques de l'EVI que nous étions en capacité de faire varier :

- la largeur du champ visuel (i.e., 32°, 106°) ;
- le niveau d'interactivité (i.e., manette avec rotation, clavier sans rotation) ;
- la fréquence d'image (i.e., 30FPS, 70FPS) ;
- le feedback du contenu 3D (i.e., avec un plan réduit de l'environnement, sans plan réduit).

---

<sup>57</sup> Absence de coordination des mouvements.

A ces caractéristiques techniques paramétrables, nous avons ajouté une caractéristique « contrôlable » de l'utilisateur, à savoir : l'expérience précédente des technologies 3D (i.e., avec ou sans expérience).

En contrôlant ces caractéristiques, nous avons pu mesurer leur impact sur les composants de l'UX à l'aide d'un questionnaire conçu et validé sur la base de questionnaires existants. Chaque questionnaire existant (i.e., PQ<sup>58</sup>, ITQ<sup>59</sup>, Flow4D16 devenu EduFlow2<sup>60</sup>, CSE<sup>61</sup>, AEQ<sup>62</sup>, SUS<sup>63</sup>, UTAUT<sup>64</sup>, AttrakDiff<sup>65</sup>, SSQ<sup>66</sup>) a permis de constituer une sous-échelle de notre questionnaire d'UX IVEQ. Les 10 sous-échelles du questionnaire (9 sous-échelles après validation du questionnaire) d'UX correspondent aux 10 composants de l'UX identifiés pour les EVI.

Nous avons pris en compte l'utilisabilité objective et pas l'utilisabilité subjective dont la sous-échelle dans le questionnaire d'UX IVEQ n'a pas été valide. Les métriques de temps de réalisation de la tâche, niveau atteint, score total et nombre d'erreurs ont donc constitué la mesure de l'utilisabilité objective.

L'interdépendance de ces 10 composants ainsi que les relations entre facteurs d'influence et composants sont représentés dans notre modèle d'UX IVEM. Le questionnaire associé constitue un outil opérationnel d'aide à la conception dans la mesure où il permet d'évaluer les prototypes en cours de conception de manière à les optimiser en termes d'UX.

### **3. Discussion des résultats : de la validation à l'application du modèle et du questionnaire d'UX**

Nous discutons des contributions de nos données empiriques de validation et d'application de notre modèle et de notre questionnaire d'UX. Nous nous intéressons d'abord aux résultats de notre première étude expérimentale (objectif 1) sur l'interdépendance des composants du modèle et sur l'influence des facteurs sur ces composants. Puis, nous abordons les résultats de notre seconde étude (objectif 2) sur la validation du questionnaire d'UX opérationnalisant le modèle. Enfin nous nous focalisons sur notre troisième étude (objectif 3) portant sur l'évaluation de l'UX d'un EVI ludo-éducatif dans le cadre de la comparaison de deux périphériques immersifs.

---

<sup>58</sup> Presence Questionnaire (Questionnaire de présence)

<sup>59</sup> Immersive Tendencies Questionnaire (Questionnaire de tendances immersive)

<sup>60</sup> *Flow in education (Le flow pour l'éducation)*

<sup>61</sup> Computer Self-Efficacy (mesure efficacité personnel avec les ordinateurs)

<sup>62</sup> Achievement Emotions Questionnaire (Questionnaire d'émotion)

<sup>63</sup> System Usability Scale (Echelle d'utilisabilité pour les systèmes)

<sup>64</sup> Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (Questionnaire de l'acceptation et de l'usage de la technologie)

<sup>65</sup> Perceived hedonic and pragmatic quality (Questionnaire de qualité hédonique et pragmatique)

<sup>66</sup> Simulator Sickness Questionnaire (Questionnaire du « mal du simulateur »)

### 3.1 Validation d'un modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif

Les chapitres CHAPITRE III et CHAPITRE VI ont permis de présenter un modèle de l'UX qui est une interprétation statistiquement valide des perceptions de l'utilisateur lorsque ce dernier interagit dans un EVI. Son analyse apporte des précisions sur l'UX à plusieurs niveaux. Premièrement, il propose une liste de perceptions ressenties par l'utilisateur. Lorsque ce dernier interagit avec une technologie de type EVI, il a des réactions psychologiques et physiologiques que nous avons tenté d'identifier tout d'abord au travers de la littérature puis à travers notre étude empirique. Deuxièmement, le modèle précise l'influence que ces perceptions ont les unes sur les autres. Nous avons tenté d'identifier ces liens à partir de modèles théoriques existants, puis nous les avons confirmés ou infirmés *via* une validation statistique. Enfin, le modèle précise également les facteurs d'influence extérieurs qui existent sur ces perceptions. Ces facteurs sont multiples et nous avons dû sélectionner un certain nombre de caractéristiques dans la littérature afin d'investiguer leur influence.

#### 3.1.1 Principaux résultats de la validation du modèle IVEM

Les principaux résultats de la validation de l'interdépendance des composants du modèle IVEM de base nous montrent qu'il est incomplet. L'analyse statistique des pistes causales entre composants a permis de le réajuster en supprimant 6 relations et de le compléter avec 9 nouvelles relations entre les composants du modèle. Ces changements aboutissent à un modèle IVEM modifié.

Ces résultats sont statistiquement valides mais faiblement fiables d'après l'analyse MES. Ce qui constitue une des faiblesses principales de notre analyse. En effet, bien que les relations du modèle modifié soient toutes statistiquement validées, il reste néanmoins incomplet du point de vue des indices de la qualité d'ajustement. Ils suggèrent que d'autres composants et relations pourraient compléter les listes existantes. Le modèle ne peut donc être considéré comme définitif, mais nous suggérons deux pistes possibles pour en ajuster la fiabilité : en utilisant des méthodes de recueil des données de même nature pour tous les composants (i.e., subjectives ou objectives), en combinant chaque donnée subjective avec des données objectives pour une meilleure fiabilité (e.g., utilisabilité subjective et utilisabilité objective).

#### 3.1.2 L'interdépendance des composants du modèle IVEM

Ce modèle revêt néanmoins une contribution quant à la compréhension de l'interdépendance des composants de l'UX dans le domaine des EVI. En effet, il constitue une première base de données exploratoire de la tendance des relations entre composants en fonction du domaine, de la technologie, du profil des participants etc. afin de constituer des modèles de référence en fonction de ces contextes (e.g., présence importante de la relation flow→émotion dans le domaine ludique, absence

importante de la relation flow→adoption de la technologie dans le domaine de l'éducation).

De plus, une telle étude sur les relations d'interdépendance des composants de l'UX, a révélé des relations jusqu'ici non étudiées dans la littérature. Ce qui indique l'importance de mettre en place une série d'études sur l'exploration de l'UX dans différents contextes et de constituer une base de données de références sur ces relations d'interdépendance.

La liste de composants de notre modèle se veut exhaustive. En effet, notre modèle holistique c'est-à-dire adapté à plusieurs domaines, contextes et technologies, suppose que chacun de ses composants et facteurs sont systématiquement présents dans tous les cas de figures. Imaginons deux cas : 1) un EVI à un joueur dans lequel l'interaction se fait uniquement avec des objets inanimés et 2) un EVI de collaboration qui consiste à réaliser une tâche à plusieurs joueurs. Dans ces deux cas de figures l'utilisateur dont on mesure l'expérience percevra les dix composants de l'UX (i.e., flow, émotion, compétence, utilisabilité, présence, engagement, immersion, conséquence de l'expérience, adoption de la technologie, jugement) que nous avons identifiés. En revanche, les composants et les relations de notre modèle de l'UX se préciseront (i.e., présence ou non des relations, évaluation positive ou non des composants) d'une manière spécifique aux EVI de collaboration et aux EVI mono-joueur du fait de leur particularité (e.g., collaborative ou non, communicationnelle ou non).

### 3.1.3 L'impact des caractéristiques de l'EVI et de l'utilisateur sur les composants du modèle IVEM

Nous avons conduit une analyse de l'impact des caractéristiques techniques de l'EVI (e.g., largeur du champ visuel, niveau d'interactivité) et de l'expérience précédente de l'utilisateur sur les composants de l'UX. Les principaux résultats montrent que seuls le niveau d'interactivité, la fréquence d'image et l'expérience précédente des technologies 3D ont un impact sur l'UX subjective, plus particulièrement sur 8 des 9 composants (i.e., flow, immersion, compétence, émotion, présence, engagement, adoption de la technologie, jugement). Aucun de ces facteurs ne semblent impacter les conséquences de l'expérience. En outre, la largeur du champ visuel, le niveau d'interactivité, la fréquence d'image et l'expérience précédente ont un impact sur l'utilisabilité objective (i.e., niveau atteint, temps de réalisation de la tâche, score total, nombre d'erreurs). Le feedback du contenu 3D est le seul facteur qui ne semble pas influencer l'UX.

Ces résultats sont statistiquement valides, mais aussi fiables et avérés si on les compare à la littérature dans la mesure où des études similaires ont été réalisées et les résultats obtenus sont comparables aux nôtres. Cependant, une première limite de cette analyse concerne le choix des facteurs d'influence. Ces derniers sont des caractéristiques techniques de l'EVI, une caractéristique de l'utilisateur et aucun facteur d'influence ne représente le contexte d'utilisation car nous n'avions pas la

possibilité de contrôler ce paramètre. Ces caractéristiques techniques et humaine sont tous de mêmes primordiales à l'analyse de notre modèle, puisqu'elles donnent les indications nécessaires pour améliorer les perceptions de l'utilisateur (i.e., composants de l'UX). Ces facteurs sont donc importants à identifier pour les concepteurs. Néanmoins, d'autres facteurs pourraient enrichir notre liste de facteurs et ainsi agrandir le nombre de recommandations visant à améliorer l'UX.

Une deuxième limite concerne les seuils de valeur des facteurs d'influence que nous avons testé. Nous nous sommes limités au choix de deux valeurs : par exemple, pour la largeur du champ visuel, nous avons testé un champ de vision à 106° et un champ de vision à 32°. Différents seuils intermédiaires de facteur d'influence autres que les deux que nous avons testés pourraient également être intéressants à évaluer. En effet, nos seuils sont suffisamment extrêmes les uns par rapport aux autres (e.g., feedback du contenu 3D : présence ou absence de plan réduit de l'environnement) pour provoquer une différence significative sur la valeur du composant. Pour autant, ils peuvent sembler trop extrêmes et ne nous permettent pas d'indiquer de manière précise à partir de quel seuil un effet peut être constaté sur le composant.

### 3.2 Validation du questionnaire de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif

Les chapitres IV et V ont permis de caractériser la mesure de l'UX dans les EVI. Le questionnaire d'UX IVEQ opérationnalise le modèle. En effet, il a permis de recueillir les données de l'UX subjective permettant l'analyse du modèle. En plus des données subjectives, les données d'utilisabilité objective ont été incluses dans l'analyse du modèle puisque celui-ci est composé du composant d'utilisabilité dont la sous-échelle a été invalidée dans le questionnaire d'UX.

#### 3.2.1 Principaux résultats de la validation du questionnaire IVEQ

La question de la mesure de l'UX s'est posée et nous avons à partir des données de la littérature opté pour la construction d'un outil d'évaluation subjectif de l'UX couramment utilisé en UX : un questionnaire. Nous avons tenté de valider notre questionnaire IVEQ. Les principaux résultats de sa validation aboutissent à un questionnaire affiné (de 87 à 68 items) présentant une meilleure cohérence interne des 9 sous-échelles et des 68 items restants. L'analyse de la distribution des scores par rapport à la normale nous nous confirme que notre outil est sensible en ce qui concerne 6 sous-échelles sur les 9.

Bien que ces résultats soient favorables, les principales faiblesses de cette analyse concernent l'absence d'analyse de la validité, qui est une des trois qualités psychométriques majeures avec la fiabilité et la sensibilité (e.g., analyse factorielle, discriminante, ...). Nous n'avons pas pu tester la validité à cause d'un taux de participation insuffisant, de par la nature spécifique de notre échantillon qui donne des résultats davantage adaptés à un type de profil, de la taille du questionnaire qui implique de nombreuses données à traiter à la fois pour les participants et pour l'expérimentateur. Le contexte d'expérimentation décrit de manière détaillée dans

l'étude doit être pris en compte pour une réutilisation de ces données dans de futurs travaux qui pourraient permettre d'éprouver ainsi la qualité psychométrique « validité » de l'outil. Le questionnaire IVEQ, quant à lui, peut être utilisé dans toutes études impliquant la mesure de l'UX dans un EVI indépendamment du contexte, des technologies utilisées et du profil des participants. De nouvelles données pourraient permettre de l'affiner davantage pour aboutir à un outil plus stable. En effet, ce questionnaire comportant 68 items est plus long que la taille moyenne des questionnaires d'UX, le but étant de l'ajuster au fur et à mesure de son utilisation.

### 3.2.2 Propositions d'améliorations du questionnaire IVEQ

Cet outil pourrait, cependant, être amélioré sur deux points. Premièrement, en y ajoutant des items fiables d'utilisabilité subjective puisque les précédents ont été invalidés. Deuxièmement, en sélectionnant des questionnaires sur d'autres critères pertinents que celui du nombre d'utilisations (e.g., les plus récents). Il constitue néanmoins une contribution quant à la compréhension de la façon dont les valeurs de l'UX varient en fonction du type de technologie ou du profil des utilisateurs visés (e.g., une meilleure valeur de flow dans les domaines ludiques, une moins bonne valeur de conséquence de l'expérience avec les technologies de casque mobile, ...). L'analyse de ces résultats pourrait aboutir à un outil de classement basé sur les variations de l'UX dans les divers contextes d'utilisation.

## 3.3 Application du questionnaire pour l'évaluation de deux périphériques immersifs

Le chapitre CHAPITRE VII décrit une application possible du questionnaire IVEQ. À partir d'une problématique en entreprise, nous avons imaginé en quoi notre questionnaire pouvait être un outil d'aide à la conception. L'entreprise possédait deux périphériques immersifs (le casque mobile VR ONE et le CAVE iCube) qui se distinguent principalement par : le type d'interaction (avec les mouvements de tête vs avec les mains et une manette), la taille du dispositif (un casque d'environ 20 cm de longueur et 10 cm de profondeur et de largeur vs un volume de 3 m<sup>3</sup>), le dispositif de lancement de l'application (un téléphone portable vs un ordinateur de bureau). Une même application (King Tut VR 2) a été implémentée sur ces deux périphériques. En évaluant l'UX dans ces deux cas de figures, nous avons pu détecter le meilleur périphérique adapté à l'application en termes d'UX.

### 3.3.1 Principaux résultats de l'application du questionnaire

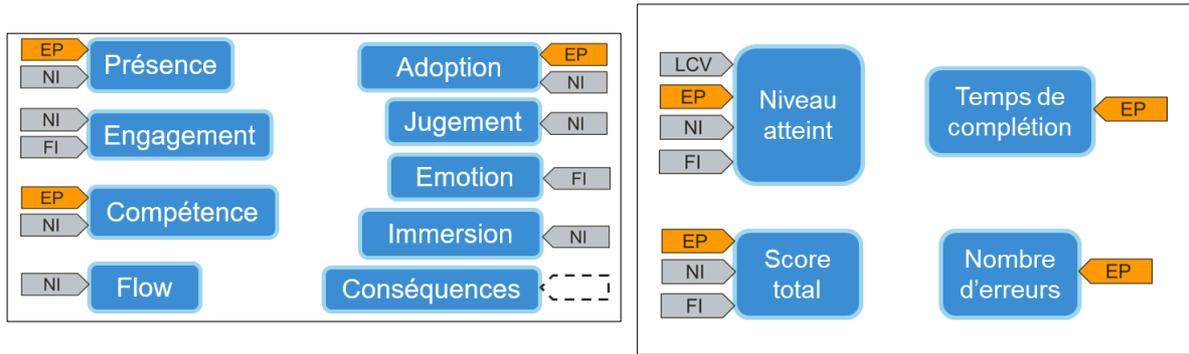
Les principaux résultats de cette comparaison indiquent que l'UX subjective de l'iCube est significativement mieux notée que le casque mobile pour 6 composants (i.e., présence, engagement, flow, compétence, jugement et conséquences de l'expérience). En outre, le temps de réalisation de la tâche est moins long pour l'iCube comparé au casque mobile. L'iCube semble proposer de meilleures perceptions et avoir une interaction plus rapide et aisée comparativement au casque mobile.

Ces résultats sont statistiquement significatifs dans notre étude empirique, et cohérents avec les études référencées dans la littérature comparant les dispositifs casque et CAVE et montrant des résultats similaires en termes d'UX subjective et d'utilisabilité objective. Néanmoins, les faiblesses principales de cette analyse se situent dans la dénomination d'une UX, et plus particulièrement d'un composant « mieux noté » ou « moins bien noté ». Cette notion de « mieux ou moins bien noté » est évidente dans certains cas : par exemple, dans le cas du composant d'émotion, le participant perçoit des émotions positives ou négatives. Or tous les composants de notre étude n'ont pas forcément de limites dites « positives » ou « négatives » comme pour les émotions. Par ailleurs, aucune étude existante ne nous a donné d'indications sur un « coefficient d'impact » des composants de l'UX. Autrement dit, si les composants de l'UX impactent à part égale ou inégale l'UX globale. Il est communément accepté que chaque composant de l'UX a une valeur égale. Identifier ces « coefficients d'impact » pour chaque composant permettrait de qualifier une meilleure ou moins bonne UX globale comparativement à une autre.

Ces résultats contribuent tout de même à informer les concepteurs d'EVI sur les composants de l'UX qui sont mieux ou moins bien notés. Cela permet de se focaliser sur les composants les moins bien notés pour essayer de les améliorer à l'aide de recommandations. Ces recommandations peuvent être fournies par notre modèle d'UX, car en jouant sur les facteurs d'influence ceux-ci agissent sur les composants de l'UX perçue par l'utilisateur.

### 3.3.2 Vers des recommandations d'amélioration de l'UX des EVI

L'évaluation d'une application implique une différence de perception par les utilisateurs des composants de l'UX (e.g., engagement, émotion, ...) et donc une notation de ces derniers qui varie selon les utilisateurs. Le but d'une application est de proposer la meilleure expérience possible et une perception optimale des composants à ses utilisateurs. Ainsi, en conclusion du chapitre CHAPITRE VII, nous avons proposé des recommandations à partir de la littérature pour améliorer les composants de l'UX. Une application possible de notre modèle d'UX IVEM serait de fournir des recommandations pour améliorer l'UX des composants les moins bien notés après une évaluation. Ainsi, les facteurs d'influence constituent les paramètres sur lesquels le concepteur peut jouer pour améliorer un composant, puisque nous avons identifié grâce à la validation de notre modèle l'influence de certains facteurs sur les composants (Figure 39. RESUME DE L'IMPACT DES FACTEURS D'INFLUENCE SUR L'UX SUBJECTIVE (GAUCHE) ET L'UTILISABILITE OBJECTIVE (DROITE)). La contribution principale de notre modèle vise les concepteurs qui peuvent ainsi bénéficier de recommandations issues de notre modèle IVEM après évaluation de leur application à l'aide de l'outil IVEQ.



➤ EP Facteurs caractéristiques de l'utilisateur  
➤ LCV Facteurs caractéristiques de l'EVI

**Figure 39. Résumé de l'impact des facteurs d'influence sur l'UX subjective (gauche) et l'utilisabilité objective (droite)**



## CONCLUSION GENERALE : APPORTS ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE



## **1. Introduction**

Cette thèse comportait trois objectifs : ils étaient de proposer et de valider un modèle théorique permettant de caractériser l'expérience utilisateur dans les environnements virtuels immersifs (objectif 1); de construire et de valider un outil de mesure de l'UX des EVI afin d'assister la conception et l'évaluation des EVI (objectif 2); de proposer une application possible de notre questionnaire et modèle aux concepteurs à partir d'une problématique réelle en entreprise (objectif 3).

Pour répondre au premier objectif, nous avons construit un modèle théorique à partir des composants clés de l'UX correspondant aux IHEVI. Puis nous avons validé le modèle holistique de l'UX (IVEM) pour les EVI qui a abouti à un modèle modifié.

Pour répondre au deuxième objectif, nous avons proposé, sur la base de la littérature, des échelles pour chacun des composants du modèle. Nous avons ensuite validé cet outil de mesure de l'UX opérationnalisant le modèle IVEM. Ce questionnaire d'UX est un outil d'aide à la conception et à l'évaluation des EVI. Il est composé de 68 items après avoir été éprouvé qui mesurent la présence (9 items), l'engagement (3 items), l'immersion (5 items), le flow (10 items), les compétences (6 items), l'émotion (11 items), les conséquences de l'expérience (8 items), le jugement (9 items) et l'adoption de la technologie (7 items) ainsi que trois questions ouvertes. Il reprend les composants identifiés dans le modèle IVEM.

Pour répondre au troisième objectif, nous avons proposé un cadre méthodologique de l'UX pour les EVI visant à assister les concepteurs dans l'évaluation d'une application immersive. Le questionnaire IVEQ a été appliqué dans le but de caractériser l'effet de deux périphériques immersifs de réalité virtuelle (i.e., Cave Automatic Virtual Environment et casque de réalité virtuelle mobile) sur l'UX de l'application « King Tut VR2 » conçue par l'entreprise EON Reality. Les deux périphériques ont été évalués consécutivement. À partir des résultats à ce questionnaire, il a été possible d'identifier les facteurs d'influence impactant négativement l'UX et de proposer des lignes directrices pour l'améliorer.

Après avoir exposé les deux apports majeurs de cette thèse (théorique et méthodologique) nous proposons deux perspectives de recherches. La première est d'élargir la portée de nos apports à d'autres domaines et dispositifs de réalité virtuelle. La deuxième perspective de notre travail de recherche concerne la création d'un outil numérique d'aide à la conception.

## **2. Apport théorique**

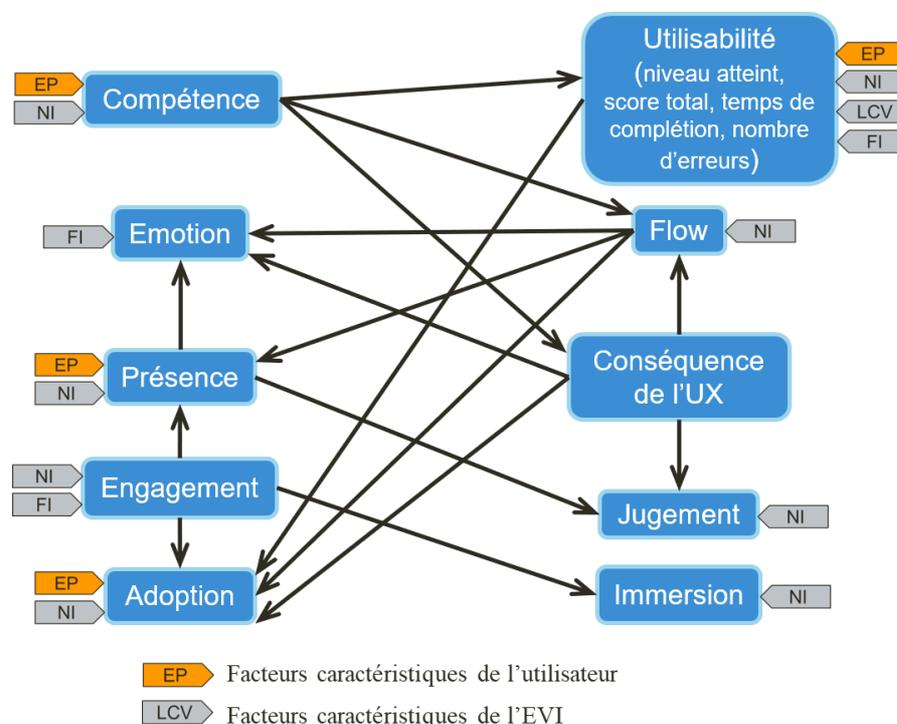
Dans un contexte où les EVI sont porteurs de nouveaux usages et comportent des enjeux sociétaux et économiques forts, nous avons voulu mettre en évidence l'importance de la qualité de l'expérience vécue dans ce type de technologies. L'UX est un concept qui met l'utilisateur au centre de la démarche de conception. Son évaluation est une étape nécessaire dans tous les domaines qui impliquent une

interaction entre l'homme et la machine. Il nous a donc semblé primordial d'explorer l'UX pour proposer et valider un modèle d'UX pour les EVI.

Nous avons réalisé une revue de la littérature qui a révélé que peu d'études sur les modèles d'UX des EVI existaient. Les quelques modèles existants restent partiels ou spécifiques à un seul domaine. Ce qui nous a conduit à sélectionner les composants clés de plusieurs de ces modèles théoriques provenant de différents domaines pour constituer un modèle holistique adapté à plusieurs domaines relatifs aux EVI. Nous sommes ensuite allés plus loin en proposant des facteurs d'influence susceptibles d'impacter les composants de l'UX. On a mesuré ici combien il est difficile de prévoir tous les facteurs d'influence possibles (provenant de l'EVI, de l'utilisateur, du contexte) impactant l'UX, nous nous sommes donc limités à certains facteurs techniques de l'EVI et relatifs à l'utilisateur, que nous pouvions contrôler.

Notre modèle IVEM (Figure 40) vient ainsi combler un manque dans la littérature quant aux modèles d'UX.

Plus précisément, le processus de validation de ce modèle en deux temps confirme des relations entre composants déjà étudiées (e.g., le degré de compétences perçues impacte l'état de flow de l'utilisateur), invalide des relations déjà étudiées (e.g., le sentiment de présence impacte le sentiment de présence) et révèle des relations jusqu'alors non investiguées dans la littérature (e.g., les conséquences de l'UX influencent le flow). Ce modèle est innovant dans le sens où il sert à la fois de cadre caractérisant l'UX mais également de cadre proposant des recommandations pour améliorer l'UX.



**Figure 40. Modèle IVEM final**

EP : Expérience précédente avec les technologies 3D ; NI : Niveau d'interactivité ; LCV : Largeur du champ visuel ; FI : Fréquence d'image

### 3. Apport méthodologique

L'une des principales préoccupations des entreprises éditrices d'applications de réalité virtuelle est de proposer des contenus et des interactions virtuelles adaptés aux utilisateurs finaux, et ceci en limitant au maximum le temps de conception. La méthode de conception centrée utilisateur tente de répondre à ces besoins (i.e., rapidité et qualité) en intégrant l'utilisateur au sein du processus de conception afin de s'assurer que le produit final corresponde à ses besoins (Sagot & Gomes, 2003). C'est une méthode communément utilisée dans plusieurs domaines notamment celui de l'IHM et de l'Ergonomie. Lors de la phase d'évaluation, des tests utilisateur sont souvent mis en place à chaque finalisation d'un prototype afin d'identifier ses points à améliorer. C'est dans ce contexte que nous avons proposé un outil d'évaluation de l'UX pour les EVI destiné aux concepteurs. Sous forme de questionnaire, cet outil peut être combiné à des méthodes d'évaluation objectives. Il s'utiliserait pour évaluer la qualité de l'UX lors de tests utilisateur aussitôt qu'un prototype d'EVI est finalisé et pour identifier les points faibles à améliorer.

Nous avons constaté que les études sur les questionnaires d'UX proposent généralement des questionnaires permettant de mesurer un ou deux composant(s) ; les études qui proposent des questionnaires permettant de mesurer un certain nombre de composants sont en général spécifiques à un domaine. Finalement, nous n'avons pu trouver aucun outil nous permettant d'éprouver l'UX caractérisée à travers notre modèle, nous avons donc construit le nôtre. Ce travail est original dans le sens où il apporte un outil de mesure subjectif combiné à des mesures objectives (e.g., utilisabilité objective) dont une utilisation possible est décrite de manière détaillée et où des applications similaires peuvent être déclinées sous plusieurs formes : technologies différentes.

Pour concevoir notre outil, un travail de sélection de questionnaires et d'items ainsi que de validation de sous-échelles et d'items nous a permis d'aboutir à notre questionnaire d'UX unifié de 68 items. Nous avons décrit dans le CHAPITRE IV une application possible du questionnaire : la comparaison de deux périphériques immersifs en termes d'UX lors de l'utilisation de l'application King Tut VR2.

Il résulte de ce travail une base méthodologique avec un questionnaire validé (**ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE D'EXPÉRIENCE UTILISATEUR**) qui opérationnalise le modèle d'UX IVEM et qui sert d'outil d'aide à la conception des EVI. Cet outil mesure les jugements des utilisateurs quant à divers composants de l'UX et permet en ce sens d'orienter les choix de conception ou d'identifier les points d'un EVI pouvant être optimisés en matière d'UX suite à des évaluations conduites avec des utilisateurs sur des versions intermédiaires d'un EVI.

## 4. Perspectives de recherche

Nous suggérons deux perspectives de recherche : élargir la portée de notre modèle et questionnaire à d'autres domaines et le développement d'un outil numérique d'aide à la conception.

### 4.1. Elargir la portée de notre modèle et questionnaire de l'UX des EVI

Notre modèle et notre questionnaire sont un cadre permettant d'évaluer et d'améliorer l'UX des applications d'EVI en cours de conception. Nous proposons quelques perspectives futures de recherche.

Parmi les différents profils d'utilisateurs de nos deux applications, un profil majoritaire a été identifié, celui d'un homme jeune ayant des affinités avec les technologies 3D. Cela a certainement affecté les résultats et favorisé ou défavorisé certaines relations d'interdépendance des composants. Elargir notre modèle et son questionnaire d'UX nécessiterait donc de l'appliquer à des projets où les utilisateurs sont différents de notre profil majoritaire (e.g., femmes, seniors, technophobes, etc.).

La réalité virtuelle rassemble un ensemble de disciplines et de technologies diverses. Or nous nous sommes focalisés sur une discipline et deux types de technologies pour valider notre modèle. Les lignes directrices issues de notre modèle sont donc également spécifiques à ce contexte. Afin de valider et de généraliser nos lignes directrices à plusieurs domaines et technologies, nous devons déployer notre modèle et son questionnaire dans le cadre de projets de conception d'EVI divers (e.g., collaboratif, formation, ...).

Par ailleurs, ces lignes directrices sont également limitées aux facteurs d'influence que nous proposons. Or il serait pertinent d'établir des lignes directrices pour d'autres situations à partir de l'application du modèle et du questionnaire à d'autres projets de conception. Ainsi chaque discipline pourra se référer à la section de lignes directrices qui lui correspond. Un guide de préconisations pourra être établi et ce sera au concepteur de déterminer quelle recommandation suivre à partir des informations sur le public visé, la technologie choisie, le domaine.

Une autre perspective serait d'affiner la définition d'une bonne ou mauvaise UX en établissant des seuils limites pour chaque composant de notre modèle.

### 4.2. Vers le développement d'un outil numérique d'aide à la conception

Les outils numériques d'aide à la conception sont nombreux notamment dans les domaines du web ou des applications mobiles. Il existe aujourd'hui une vraie dynamique autour de l'évaluation subjective (e.g., questionnaires) ou objective (e.g., enregistrement des déplacements de la souris) des utilisateurs en ligne lors de leur utilisation des applications. L'objectif est de capturer leur usage réel afin de leur

proposer une meilleure expérience utilisateur qui correspond davantage à leurs attentes et besoins. Or peu d'outils numériques d'évaluation sont proposés pour les EVI. Un tel outil permettrait pourtant d'automatiser les calculs statistiques qui détermineraient en fonction de certains critères (e.g., note d'un composant sous le seuil x), une sélection de recommandations appropriées à chaque situation.

Plus particulièrement, cet outil se déclinerait sous la forme d'une plateforme en ligne dédiée aux tests d'UX pour les EVI. Elle mettrait en relation un panel ciblé de testeurs avec des concepteurs d'EVI. Les futurs testeurs s'inscriraient en ligne en fonction de leur proximité avec le lieu où se trouve l'application à tester et rempliraient un pré-questionnaire pour renseigner leur profil. La plateforme permettrait de faire une sélection de testeurs en fonction des utilisateurs finaux visés, les tests utilisateur se réaliseraient sein de l'entreprise afin de pouvoir les observer. Les utilisateurs rempliraient ensuite le questionnaire d'UX numérique. Les données seraient traitées après validation et généreraient un compte-rendu (e.g., nombre de testeurs, note pour chaque composant de l'UX, recommandations pour les composants les moins bien notés) en ligne consultable par les concepteurs pour chaque application testée.

## **5. Entrepreneuriat**

Sur la base de ces travaux, je développe aujourd'hui un projet d'entreprise autour de l'idée d'un outil numérique d'aide à la conception (voir section 4.2). Le projet VXMO (Virtual eXperience Mode On) vise à libérer le potentiel d'innovation offert par la RV, en intervenant sur l'amélioration de ses applications en cours de conception. L'idée fondatrice est que la dimension humaine n'est pas suffisamment ou correctement prise en compte : or qui sont les mieux placés, sinon les utilisateurs eux-mêmes, pour créer les usages de la RV qui leur correspondent le mieux ? C'est pourquoi je propose d'utiliser les méthodologies issues de la recherche, pour mettre en place des tests utilisateurs afin que les éditeurs logiciels bénéficient des retours d'expérience d'un échantillon présélectionné suivant leurs utilisateurs finaux. Les applications ainsi créées respecteraient les valeurs et les usages des futurs utilisateurs.

Ce projet a été finaliste au concours Docteurs-Entrepreneurs 2017 (<http://www.rue-aef.com/finalistes-concours-docteurs-entrepreneurs-2017/>), primé (i.e., prix espoir) au prix de l'initiative 2017 (<http://www.prix-initiative.fr>) et lauréat des pays de la Loire au prix PEPITE TREMPLIN 2016 (<http://www.creer.lunam.fr/les-laureats-des-pays-de-la-loire-prix-pepите-tremplin-2016>).



## BIBLIOGRAPHIE



- Lampton, D. R., Knerr, B. W., Goldberg, S. L., Bliss, J. P., Moshell, J. M., & Blau, B. S. (1994). The Virtual Environment Performance Assessment Battery (VEPAB): Development and Evaluation 1. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2), 145-157.
- Abran, A., Khelifi, A., Suryan, W., & Seffah, A. (2003). Consolidating the ISO usability models. *Proceedings of 11th international software quality management conference, 2003*, pp. 23-25.
- Ajzen, I. (1985). From intentions to actions: A theory of planned behavior. In J. Kuhl, & J. Beckmann (Eds.), *Action control : from cognition to behavior* (pp. 11-39).
- Alben, L. (1996). Defining the criteria for effective interaction design. *Interactions*, 3(3), 11-15.
- Alsina-Jurnet, I., & Gutiérrez-Maldonado, J. (2010). Influence of personality and individual abilities on the sense of presence experienced in anxiety triggering virtual environments. *International journal of human-computer studies*, 68(10), 788-801.
- Anderson, J. C., & Gerbing, D. W. (1984). The effect of sampling error on convergence, improper solutions, and goodness-of-fit indices for maximum likelihood confirmatory factor analysis. *Psychometrika*, 49(2), 155-173.
- Aranda, A., Dieste, O., & Juristo, N. (2014). Evidence of the presence of bias in subjective metrics: Analysis within a family of experiments. *the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering* (p. 24). ACM.
- Ardito, C., Buono, P., Caivano, D., Costabile, M. F., & Lanzilotti, R. (2014). Investigating and promoting UX practice in industry: An experimental study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72(6), 542-551.
- Arhippainen, L., & Tähti, M. (2003). Empirical evaluation of user experience in two adaptive mobile application prototypes. *Proceedings of the 2nd International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia* (pp. 27-34). Linköping University Electronic Press.
- Baccino, T., Bellino, C., & Colombi, T. (2005). *Mesure de l'utilisabilité des interfaces*. Hermès Science-Lavoisier.
- Bagozzi, R. P., & Yi, Y. (1988). On the evaluation of structural equation models. *Journal of the academy of marketing science*, 16(1), 74-94.
- Barcenilla, J., & Bastien, J. M. (2009). L'acceptabilité des nouvelles technologies: quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur? *Le travail humain*, 72(4), 311-331.
- Baudouin, C., Beney, M., Chevaillier, P., & Le Pallec, A. (2007). Recueil de traces pour le suivi de l'activité d'apprenants en travaux pratiques dans un environnement de réalité virtuelle. *Revue Sticef.org*, 14.
- Baus, O., Bouchard, S., Gougeon, V., & Roucaut, F. X. (2011). Comparison of anxiety in response to virtual spiders while immersed in augmented reality, head-mounted display, or CAVE-like system. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 4(2), 171-175.

- Bellino, C. (2013). Contribution de l'architecture de l'information à l'utilisabilité informationnelle: le cas des intranets. *Études de communication*, 2, 71-88.
- Bentler, P. M. (1990). Comparative fit indexes in structural models. *Psychological bulletin*, 107(2), 238.
- Bentler, P. M., & Yuan, K. H. (1999). Structural equation modeling with small samples: Test statistics. *Multivariate behavioral research*, 34(2), 181-197.
- Bernaudo, J. L. (2014). *Méthodes de tests et questionnaires en psychologie*. Paris: Dunod.
- Bevan, N. (2009). Usability. In *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 3247-3251). Springer US.
- Biocca, F. (1992). Will simulation sickness slow down the diffusion of virtual environment technology? *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(3), 334-343.
- Biocca, F. (1997). The cyborg's dilemma: Progressive embodiment in virtual environments. *Journal of computer-Mediated Communication*, 3(2).
- Blandford, A. E., Butterworth, R., & Curzon, P. (2001). PUMA Footprints: linking theory and craft skill in usability evaluation. In M. Hirose (Ed.), *In Proceedings of the Human-Computer Interaction (INTERACT'01)* (pp. 577-584). Amsterdam, The Netherlands: IOS Press.
- Bonenfant, M., & Genvo, S. (2014). Une approche située et critique du concept de gamification. *Sciences du jeu*, 2.
- Bossard, C., Kermarrec, G., De Loor, P., & Pénard, R. (2009). Sport, réalité virtuelle et conception de simulations participatives. Illustration dans le domaine du football avec le simulateur CoPeFoot. *Intellectica*, 52, 97-117.
- Bouchard, S., Renaud, P., Robillard, G., & St-Jacques, J. (2002). Applications of virtual reality in clinical psychology : Illustration with the treatment of anxiety disorders. *IEEE International workshop on haptic virtual environments and their applications* (pp. 7-12). IEEE.
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40, 36-43.
- Bowman, D. A., Datey, A., Farooq, U., Ryu, Y. S., & Vasnaik, O. (2001). *Empirical Comparisons of Virtual Environment Displays, Technical Report TR-01-19*. Virginia Tech: Dept. of Computer Science.
- Brangier, E., & Barcenilla, J. (2003). *Concevoir un produit facile à utiliser*. Paris: Editions d'organisation.
- Bréandon, C. (2012). *Approches esthétique, médiatique et sémantique du design interactif*. Doctoral dissertation, Université de Toulon.
- Brinkman, W. P., Haakma, R., & Bouwhuis, D. G. (2009). The theoretical foundation and validity of a component-based usability questionnaire. *Behaviour & Information Technology*, 28(2), 121-137.
- Brockmyer, J. H., Fox, C. M., Curtiss, K. A., McBroom, E., Burkhart, K. M., & Pidruzny, J. N. (2009). The development of the Game Engagement Questionnaire: A measure of

- engagement in video game-playing. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4), 624-634.
- Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. Usability evaluation in industry. *189(194)*, 4-7.
- Brown, E., & Cairns, P. (2004). A grounded investigation of game immersion. In *Proceedings of the CHI'04 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 1297-1300). ACM.
- Buche, C. (2005). *Un système tutoriel intelligent et adaptatif pour l'apprentissage de compétences en environnement virtuel de formation*. Doctoral dissertation. Université de Bretagne occidentale-Brest.
- Burkhardt, J. M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(1), 65-91.
- Burkhardt, J. M., & Sperandio, J. C. (2004). 26. Ergonomie et conception informatique. *Ergonomie*, 437-450.
- Burkhardt, J. M., Bardy, B., & Lourdeaux, D. (2003). Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels. *Psychologie française*, 48(2), 35-42.
- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie: quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(1), 65-91.
- Cabral, M. C., Morimoto, C. H., & Zuffo, M. K. (2005). On the usability of gesture interfaces in virtual reality environments. In *Proceedings of the 2005 Latin American conference on Human-computer interaction* (pp. 100-108). ACM.
- Calvary, G. (2002). Ingénierie de l'interaction homme machine: rétrospective et perspectives. In *Traité des Sciences et Techniques de l'Information-Interaction homme-machine et recherche d'information* (pp. 19-63). C. Paganelli Ed., Hermès.
- Chalon, R., & David, B. T. (2004). Modélisation de l'interaction collaborative dans les systèmes de Réalité Mixte. *Proceedings of the 16th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (pp. 37-44). ACM.
- Chang, H. H., & Wang, I. C. (2008). An investigation of user communication behavior in computer mediated environments. *Computers in Human Behavior*, 24(5), 2336-2356.
- Chen, J. Y., & Thropp, J. E. (2007). Review of low frame rate effects on human performance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 37(6), 1063-1076.
- Cheng, L. K., Chieng, M.-H., & Chieng, W.-H. (2014). Measuring virtual experience in a three-dimensional virtual reality interactive simulator environment: a structural equation modeling approach. *Virtual Reality*, 18, 173-188.
- Chung, J. C., Harris, M. R., & Brooks, F. P. (1989). Exploring virtual worlds with head-mounted displays. Non-Holographic True 3-D Dimensional Display Technologies. *SPIE Proceedings*, 1083, pp. 15-20. Los Angeles, CA.

- Clais, J. B., & Roustan, M. (2003). "Les jeux vidéo, c'est physique!" Réalité virtuelle et engagement du corps dans la pratique vidéoludique. *La pratique du jeu vidéo: réalité ou virtualité*, 35-62.
- Claypool, K. T., & Claypool, M. (2007). On frame rate and player performance in first person shooter games. *Multimedia systems*.
- Clemmensen, T., & Plocher, T. (2007). The cultural usability (CULTUSAB) project: studies of cultural models in psychological usability evaluation methods. *International Conference on Usability and Internationalization* (pp. 274-280). Springer Berlin Heidelberg.
- Cobb, S. V., Nichols, S., Ramsey, A., & Wilson, J. R. (1999). Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE). *Presence: teleoperators and virtual environments*, 8(2), 169-186.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd edn. Hillsdale, New Jersey: L.
- Comrey, A. L., & Lee, H. B. (1992). A first course in factor analysis. (Erlbaum, Ed.)
- Counter Strike: Source*. (2004). Retrieved 09 01, 2017, from STEAM: [www.store.steampowered.com/app/240/](http://www.store.steampowered.com/app/240/)
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., & DeFanti, T. A. (1993). Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. *Computer graphics and interactive techniques* (pp. 135-142). ACM.
- Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V., & Hart, J. C. (1992). The CAVE: Audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, 35(6), 64-73.
- Csikszentmihalyi, M. (1975). *Beyond boredom and anxiety*. Jossey-Bass.
- Csikszentmihalyi, M. (1990). *The psychology of optimal experience*. New York: Harpers and Row.
- Csikszentmihalyi, M., & LeFevre, J. (1989). Optimal experience in work and leisure. *Journal of personality and social psychology*, 56(5), 815.
- Dalsgård, P., & Halskov, K. (2006). Real life experiences with experience design. *Proceedings of the 4th Nordic conference on Human-computer interaction: changing roles* (pp. 331-340). ACM.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 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.
- Davis, S., Nesbitt, K., & Nalivaiko, E. (2014). A systematic review of cybersickness. *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment* (pp. 1-9). ACM.
- Deci, E. L. (1975). *Intrinsic motivation*. New York: Plenum Press.

- Déro, M., & Heutte, J. (2008). Impact des TIC sur les conditions de travail dans un établissement d'enseignement supérieur : auto-efficacité, flow et satisfaction au travail. *Actes des 2e Journées Communication et apprentissage instrumenté en réseau (JOCAIR'2008)* (pp. 192-205). Amiens (France): M. Sidir, E. Bruillard, GL. Baron.
- Devellis, R. F. (2003). *Scale Development: Theory and Applications*, Second Edition. *Applied Social Research Methods Series*, 26.
- 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, pp. 1017-1021. SAGE Publications.
- DIS, ISO. 9241-210: 2010. (2009). *Ergonomics of human system interaction-Part 210: Human-centred design for interactive systems*. Switzerland: International Standardization Organization (ISO).
- Dix, A., Finlay, J., Abowd, G., & Beale, R. (1993). *Human-Computer Interaction*. New-Jersey: Prentice-Hall.
- Dow, S., Mehta, M., Harmon, E., MacIntyre, B., & Mateas, M. (2007). Presence and engagement in an interactive drama. *In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 1475-1484). ACM.
- Downes, M., Cavusoglu, C., Gantert, W., Way, L. W., & Tendick, F. (1998). VEs for training critical skills in laparoscopic surgery. In *Proceedings of (MMVR'98)*, CA, January 28-31, 1998, p2. J.D. Westwood e. In J. Westwood (Ed.), *Medicine Meets Virtual Reality VI* (pp. 316-322). San Diego: IOS Press, Amsterdam.
- Dreyfus, S. E. (2004). The five-stage model of adult skill acquisition. *Bulletin of science, technology & society*, 24(3), 177-181.
- Dupré, D., Dubois, M., & Tcherkassof, A. (2017). Rôle de l'émotion dans l'acceptabilité d'un produit: évaluation des composantes cognitive, motivationnelle et subjective. *Psychologie du Travail et des Organisations*.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.pto.2017.07.001>
- Durlach, N. (1997). The potential of teleoperation for entertainment and education. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3, 350-351.
- Edward, L., Lourdeaux, D., Barthès, J.-P., Lenne, D., & Burkhardt, J.-M. (2008). Modelling Autonomous Virtual Agent Behaviours in a Virtual Environment for Risk. *The International Journal of Virtual Reality*, 7(3), 13-22.
- Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.
- Ermi, L., & Mäyrä, F. (2005). Fundamental components of the gameplay experience: Analysing immersion. In S. De Castell, & J. Jenson, *Worlds in play: International perspectives on digital games research* (Vol. 21, pp. 37-53). Peter Lang.
- Everaere, C. (2000). La compétence: un compromis multidimensionnel fragile. *GESTION* 2000, 4, 53-72.

- Eynard, R. (2016). *Investigation de l'impact de l'interaction sociale vocale sur l'expérience utilisateur dans les environnements 3D temps-réel immersif*. Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.
- Faulkner, L., & Wick, D. (2005). Cross-user analysis: Benefits of skill level comparison in usability testing. *Interacting with Computers*, 17(6), 773-786.
- Ferey, N., Delande, O., Grasseau, G., & Baaden, M. (2008). A VR Framework for Interacting with Molecular Simulations. *Virtual Reality Software and Technologies*. ACM.
- Fernandez, L., Aulagnier, M., Bonnet, A., Guinard, A., Pedinielli, J. L., & Préau, M. (2005). *Module VI : Outils Psychométriques. Démarches épidémiologiques après une catastrophe*. (P. Verger, M. Aulagnier, V. Schwoebel, T. Lang, & (Dir), Eds.)
- Février, F., Gauducheau, N., Jamet, E., & Rouxel, G. (2011). La prise en compte des affects dans le domaine des interactions homme-machine: quels modèles, quelles méthodes, quels bénéfices? *Le travail humain*, 74(2), 183-201.
- Fishbein, M., & Ajzen, I. (1975). *Belief, attitude, intention and behavior : An introduction to theory and research*. New York: Addison-Wesley Publishing Company.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*.
- Fitts, P. M., & Peterson, J. R. (1964). Information capacity of discrete motor responses. *Journal of experimental psychology*, 67(2), 103.
- Fleury, P., & Madeleine, S. (2007). Réalité virtuelle et restitution de la Rome antique du IVe siècle après. *Histoire urbaine*, 18, 161-169.
- Fogg, B. J., & Tseng, H. (1999). The elements of computer credibility. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 80-87). ACM.
- Fontaine, G. (1992). The experience of a sense of presence in intercultural and international encounters. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1, 482-490.
- Forlizzi, J., & Ford, S. (2000). The building blocks of experience: An early framework for interaction designers. *Proceedings of Conference on Designing Interactive Systems 2000*, (pp. 419-423).
- Fournier, J., Gaudreau, P., Demontrond-Behr, P., Visioli, J., Forest, J., & Jackson, S. (2007). French translation of the Flow State Scale-2: Factor structure, cross-cultural invariance, and associations with goal attainment. *Psychology of Sport & Exercise*, 8(6), 897-916.
- Franzen, G. (1999). *Brands & advertising : how advertising effectiveness influences brand equity*. Oxfordshire, United Kingdom: Henley-on-Thames: Admap Publications.
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2003). *Le traité de la réalité virtuelle, 2ème édition, Volume 1: Fondements et interfaces comportementales*. Les presses de l'École des Mines.
- Fuchs, P., & Moreau, G. (2006). *Le traité de la réalité virtuelle* (Vol. (Vol. 2)). Presses des MINES.

- Fuchs, P., & Richir, S. (2003). (2003). Réalité virtuelle et conception: méthodes. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*, 13(2), AG2521-1.
- Fuchs, P., Arnaldi, B., & Tisseau, J. (2003). La réalité virtuelle et ses applications. In P. Fuchs, & G. Moreau, *Le traité de la réalité virtuelle. Volume 1 : fondements et interfaces comportementales* (pp. 3-52). Presse de l'Ecole des Mines de Paris.
- Gaggioli, A., Bassi, M., & Fave, A. D. (2003). Quality of experience in virtual environments. *Emerging Communication*, 5, 121-136.
- Geslin, E., Bouchard, S., & Richir, S. (2011). Gamers' versus non-gamers' emotional response in virtual reality. *Journal of CyberTherapy & Rehabilitation*, 4(4). Retrieved from <http://www.vrphobia.eu/publications/journal-of-cybertherapy-rehabilitation>
- Ghani, J. A., & Deshpande, S. P. (1994). Task characteristics and the experience of optimal flow in human—computer interaction. *The Journal of psychology*, 128(4), 381-391.
- Goetz, T., Pekrun, R., Hall, N., & Haag, L. (2006). Academic emotions from a social-cognitive perspective: Antecedents and domain specificity of students' affect in the context of Latin instruction. *British Journal of Educational Psychology*, 76(2), 289-308.
- Greenhalgh, T., Robert, G., Macfarlane, F., Bate, P., & Kyriakidou, O. (2004). Diffusion of innovations in service organizations: systematic review and recommendations. *Milbank Quarterly*, 82(4), 581-629.
- Grigorovici, D. M., & Constantin, C. D. (2004). Experiencing interactive advertising beyond rich media: Impacts of ad type and presence on brand effectiveness in 3D gaming immersive virtual environments. *Journal of Interactive Advertising*, 5(1), 22-36.
- Grumbach, A. (2002). Le rôle fondamental du système d'interaction dans une installation de réalité virtuelle. *Interaction Homme-Machine* (pp. 7-13). Poitiers: ACM.
- Guillevic, C., & Vautier, S. (1998). *Diagnostic et tests psychologiques*. Nathan.
- Habert, B., Salaün, J. M., & Magué, J. P. (2012). Architecte de l'information: un métier. *Documentaliste-Sciences de l'Information*, 49(1), 4-5.
- Half-Life 2*. (2004). Retrieved 09 01, 2017, from [www.half-life2.com/overview.html](http://www.half-life2.com/overview.html)
- Hammond, K., McWilliam, G., & Diaz, A. N. (1998). Fun and work on the web: Differences in attitudes between novices and experienced users. *NA-Advances in Consumer Research*, Volume 25.
- Hart, J., Sutcliffe, A. G., & De Angeli, A. (2013). Love it or hate it!: interactivity and user types. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2059-2068). ACM.
- Hassan, S. E., Hicks, J. C., Lei, H., & Turano, K. A. (2007). What is the minimum field of view required for efficient navigation ? *Vision research*, 47(16), 2115-2123.

- Hassanein, K., & Head, M. (2007). Manipulating perceived social presence through the web interface and its impact on attitude towards online shopping. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(8), 689-708.
- Hassenzahl, M. (2001). The Effect of Perceived Hedonic Quality on Product Appealingness. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 481-499.
- Hassenzahl, M. (2004). Emotions can be quite ephemeral; we cannot design them. *Interactions*, 11(5), 46-48.
- Hassenzahl, M., & Tractinsky, N. (2006). User experience-a research agenda. *Behaviour & information technology*, 25(2), 91-97.
- Hassenzahl, M., & Ullrich, D. (2007). To do or not to do: Differences in user experience and retrospective judgments depending on the presence or absence of instrumental goals. *Interacting with computers*, 19(4), 429-437.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., & Koller, F. (2003). AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität [AttracDiff: A questionnaire to measure perceived hedonic and pragmatic quality]. In I. J. (Eds.), *Mensch & Computer 2003. Interaktion in Bewegung* (pp. 187–196). Stuttgart: Leipzig: B. G. Teubner.
- 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* (pp. 201-208). ACM.
- Haudegond, S. (2013). Enjeux de l'évaluation de la gamification. *Colloque Virtuoses*. Valenciennes.
- Havlena, W. J., & Holbrook, M. B. (1986). The varieties of consumption experience: Comparing two typologies of emotion in consumer behavior. *Journal of Consumer Research*, 13, 394-404.
- Hawkins, R. P., Han, J. Y., Pingree, S., Shaw, B. R., Baker, T. B., & Roberts, L. J. (2010). Interactivity and presence of three eHealth interventions. *Computers in human behavior*, 26(5), 1081-1088.
- Held, R. M., & Durlach, N. I. (1992). Telepresence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 109-112.
- Henden, C., Champion, E., Muhlberger, R., & Jacobson, J. (2008). A surround display warp-mesh utility to enhance player engagement. *International Conference on Entertainment Computing* (pp. 46-56). Berlin Heidelberg: Springer.
- Heutte, J. (2011). *La part du collectif dans la motivation et son impact sur le bien-être comme médiateur de la réussite des étudiants: Complémentarités et contributions entre l'autodétermination, l'auto-efficacité et l'autotélisme*.
- Heutte, J., & Fenouillet, F. (2015). Propositions pour une mesure de l'expérience optimale (état de flow) en contexte éducatif. In *Actes du 26e congrès international d'actualité de la recherche en éducation et en formation (AREF2010)*.
- Hoffman, D. L., & Novak, T. P. (1996). Marketing in hypermedia computer-mediated environments: Conceptual foundations. *The Journal of Marketing*, 50-68.

- Hoffman, D. L., & Novak, T. P. (2009). Flow online: lessons learned and future prospects. *Journal of Interactive Marketing, 23*(1), 23-34.
- Holden, H., & Rada, R. (2011). Understanding the influence of perceived usability and technology self-efficacy on teachers' technology acceptance. *Journal of Research on Technology in Education, 43*(4), 343-367.
- Hsu, C. L., & Lu, H. P. (2004). Why do people play on-line games? An extended TAM with social influences and flow experience. *Information & management, 41*(7), 853-868.
- Huang, Y., & Strawderman, L. (2013). A System Transferability Questionnaire (STQ) Measuring Usability in a Multiple-Device System. *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 57*, pp. 1663-1667. Los Angeles: CA: SAGE Publications.
- Huerta, M. F., Koslow, S. H., & Leshner, A. I. (1993). The human brain project: an international resource. *Trends in neurosciences. 16*(11), 436-438.
- Hürst, W., & Helder, M. (2011). Mobile 3D graphics and virtual reality interaction. *In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology* (p. 28). ACM.
- Hürst, W., & Helder, M. (2011). Mobile 3D graphics and virtual reality interaction. *In Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology* (p. 28). ACM.
- Igbaria, M., Schiffman, S. J., & Wieckowski, T. J. (1994). The respective roles of perceived usefulness and perceived fun in the acceptance of microcomputer technology. *Behaviour & Information Technology, 13*(6), 349-361.
- ISO 20282-1. (2006). Ease of operation of everyday products. *Part 1: Design requirements for context of use and user characteristics* .
- ISO 9241-11 . (1998). Ergonomic Requirements for Office Work with Visual Display Terminals (VDTs). *Part II Guidance on Usability*.
- ISO-TR 16982. (2002). Ergonomics of human-system interaction. *Usability Methods supporting human-centered design*.
- Jarmon, L. (2009). Learning in virtual world environments: Social-presence, engagement, & pedagogy. *Encyclopedia of distance and online learning*, 1610-1619.
- Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International journal of human-computer studies, 66*(9), 641-661.
- Jeong, H. Y., Yi, G., & Park, J. H. (2016). A service composition model based on user experience in Ubi-cloud comp. , 61(4), . *Telecommunication Systems, 61*(4), 897-907.
- Jin, S. A. (2009). Avatars mirroring the actual self versus projecting the ideal self: The effects of self-priming on interactivity and immersion in an exergame, Wii Fit. *CyberPsychology & Behavior, 12*(6), 761-765.

- Jordan, P. W. (2000). *Designing pleasurable products*. London: Taylor & Francis.
- Kapp, K. M., & O'Driscoll, T. (2009). *Learning in 3D: Adding a new dimension to enterprise learning and collaboration*. John Wiley & Sons.
- Kato, H., Billinghamurst, M., Poupyrev, I., Imamoto, K., & Tachibana, K. (2000). Virtual object manipulation on a table-top AR environment. *In Augmented Reality, 2000.(ISAR 2000). Proceedings. IEEE and ACM International Symposium* (pp. 111-119). IEEE.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203-220.
- Kennedy, R. S., & Stanney, K. M. (1997). Aftereffects of virtual environment exposure: Psychometric issues. *Advances in human factors/ergonomics*, 897-900.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Lilienthal, M. G., Berbaum, K. S., & Hettlinger, L. J. (1992). Profile analysis of simulator sickness symptoms: Application to virtual environment systems. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(3), 295-301.
- Kettanurak, V. N., Ramamurthy, K., & Haseman, W. D. (2001). User attitude as a mediator of learning performance improvement in an interactive multimedia environment: an empirical investigation of the degree of interactivity and learning styles. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4), 541-583.
- Kim, D. H., Parker, D. E., & Park, M. Y. (2004). *A New Procedure for Measuring Simulator Sickness—the RSSQ*. Seattle: Technical Report R-2004-52. Human Interface Technology Laboratory, University of Washington.
- Kim, T., & Biocca, F. (1997). Telepresence via television: Two dimensions of telepresence may have different connections to memory and persuasion. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
- Kirakowski, J. (1996). The software usability measurement inventory: background and usage. In *Usability evaluation in industry* (pp. 169-178).
- Kjeldskov, J. (2001). Interaction: Full and partial immersive virtual reality displays. *IRIS24*, 587-600.
- Klimmt, C., & Vorderer, P. (2003). Media psychology “is not yet there”: Introducing theories on media entertainment to the presence debate. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 12(4), 346-359.
- Kline, R. B. (1998). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. New York: Guilford.
- Kline, R. B. (2005). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling (2nd Edition ed.)*. New York: The Guilford Press.
- Klinger, E., Marié, R. M., & Fuchs, P. (2006). Réalité virtuelle et sciences cognitives: Applications en psychiatrie et neuropsychologie. *Cognito-Cahiers Romains de Sciences Cognitives*, 3(2), 3-2.

- Kolasinski, E. M. (1996). *Prediction of Simulator Sickness in a Virtual Environment*. Florida: Thèse de doctorat, University of Central Florida Orlando.
- Kolesnikov, M., Steinberg, A. D., & Zefran, M. (2009). Haptic-Based Virtual Reality Dental Simulator as an Educational Tool. (A. Daskalaki, Ed.) *Dental Computing and Applications: Advanced Techniques for Clinical Dentistry*, 219-231.  
doi:10.4018/978-1-60566-292-3.ch014
- Kollmann, T. (2004). Attitude, adoption or acceptance? Measuring the market success of telecommunication and multimedia technology. *International Journal of Business Performance Management*, 6(2), 133-152.
- Koufaris, M. (2002). Applying the technology acceptance model and flow theory to online consumer behavior. *Information systems research*, 13(2), 205-223.
- Krijn, M., Emmelkamp, P. M., Biemond, R., de Ligny, C. D., Schuemie, M. J., & van der Mast, C. A. (2004). Treatment of acrophobia in virtual reality: The role of immersion and presence. *Behaviour research and therapy*, 42(2), 229-239.
- Lallemand, 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.
- Lallemand, C., Robillard-Bastien, A., & Gronier, G. (2015). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Paris: Eyrolles.
- Lang, P. J. (1980). Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications. In J. B. Sidowski, H. Johnson, & T. A. Williams, *Technology in Mental Health Care Delivery Systems* (pp. 119-137). Norwood, NJ: Abex.
- Laurent, G., & Kapferer, J. N. (1985). Measuring consumer involvement profiles. *Journal of marketing research*, 41-53.
- Lavie, T., & Tractinsky, N. (2004). Assessing dimensions of perceived visual aesthetics of web sites. *International journal of human-computer studies*, 60(3), 269-298.
- LaViola JR, J. J. (2000). A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI Bulletin*, 32(1), 47-56.
- Lesage, A., & Dorta, T. (2008). Au-delà de l'utilisabilité: l'autotélie. *Proceedings of the 20th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (pp. 147-150). ACM.
- Lessiter, J., Freeman, J., Keogh, E., & Davidoff, J. D. (2001). A cross-media presence questionnaire: The ITC-Sense of Presence Inventory. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10, 282-297.
- Lewi, G., & Rogliano, C. (2006). *Mémento pratique du branding: comment gérer une marque au quotidien*. France: Pearson Education.
- 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.

- Lewis, J. R., & Sauro, J. (2009). The factor structure of the system usability scale. (Springer, Ed.) *Human centered design*, 94-103.
- Lin, C. S., Wu, S., & Tsai, R. J. (2005). Integrating perceived playfulness into expectation-confirmation model for web portal context. *Information & management*, 42(5), 683-693.
- Lin, J. J., & Parker, D. E. (2007). User Experience Modeling and Enhancement for Virtual Environments That Employ Wide-Field Displays. *Digital Human Modeling*, 423-433.
- Liu, S. H., Liao, H. L., & Pratt, J. A. (2009). Impact of media richness and flow on e-learning technology acceptance. *Computers & Education*, 3, 599-607.
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the heart of it all: The concept of presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
- Lombard, M., Ditton, T. B., Crane, D., Davis, B., Gil-Egui, G., Horvath, K., . . . Park, S. (2000). Measuring presence: A literature-based approach to the development of a standardized paper-and-pencil instrument. . *Presence 2000 Workshop*. March 27-28 Delft, The Netherlands.
- Loomis, J. M. (1992). Distal attribution and presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 113-119.
- Loup-Escande, E., & Lécuyer, A. (2014). *Towards a user-centred methodological framework for the design and evaluation of applications combining brain-computer interfaces and virtual environments: contributions of ergonomics*. RR-8505. INRIA.
- MacCallum, R. C., Widaman, K. F., Zhang, S., & Hong, S. (1999). Sample size in factor analysis. *Psychological methods*. 4(1), 84-99.
- Machinal, H. (2017). Corps technologiques et environnements connectés:«The dynamic, fluid nature of reality» ou le corps face à l'écran. *TV/Series*, 11.
- Mader, S., Dupire, J., Guardiola, E., & Natkin, S. (2012). Conception de jeux thérapeutiques pour seniors: l'exemple du village aux oiseaux. *Actes du 7 ème congrès sur les aides techniques pour les personnes handicapées, Handicap 2012*, (pp. 21-26).
- Mahlke, S. (2002). Factors influencing the experience of website usage. *CHI'02 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 846-847). ACM.
- Mahlke, S. (2008). *User Experience of Interaction with Technical Systems. Theories, Methods, Empirical Results, and Their Application to the Design of Interactive Systems*. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag.
- Mahlke, S., & Minge, M. (2006). Emotions and EMG measures of facial muscles in interactive contexts. *Cognition and Emotion*, 6, 169-200.
- Mandel, N., & Johnson, E. J. (2002). When web pages influence choice: Effects of visual primes on experts and novices. *Journal of consumer research*, 29(2), 235-245.
- Marne, B., Huynh-Kim-Bang, B., & Labat, J. M. (2011). Articuler motivation et apprentissage grâce aux facettes du jeu sérieux. *Environnements Informatiques*

- pour l'Apprentissage Humain, Conférence EIAH'2011* (pp. 69-80). Mons: Editions de l'UMONS.
- Marsh, H. W., Balla, J. R., & McDonald, R. P. (1988). Goodness-of-fit indexes in confirmatory factor analysis: the effect of sample size. *Psychological Bulletin*, *103*(3), 391-410.
- McCauley, M. E., & Sharkey, T. J. (1992). Cybersickness: Perception of self-motion in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, *1*(3), 311-318.
- McMahan, A. (2003). Immersion, engagement and presence. In M. J. Wolf, & B. Perron, *The video game theory reader* (Vol. 67, p. 86).
- 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, Ed.) *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, *18*(4), 626-633.
- McMahan, R. P., Gorton, D., Gresock, J., McConnell, W., & Bowman, D. A. (2006). Separating the effects of level of immersion and 3D interaction techniques. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology* (pp. 108-111). ACM.
- McQuarrie, E. F., & Munson, J. M. (1992). A revised product involvement inventory: Improved usability and validity. *Advances in Consumer Research*, *19*, 108-115.
- Mellet-d'Huart, D., & Michel, G. (2006). *Réalité virtuelle et apprentissage. Les environnements informatiques pour l'apprentissage humain*. Paris: Hermes.
- Mikropoulos, T. A., & Strouboulis, V. (2004). Factors that influence presence in educational virtual environments. *CyberPsychology & Behavior*, *7*(5), 582-591.
- Miles, H. C., Pop, S. R., Watt, S. J., Lawrence, G. P., & John, N. W. (2012). A review of VEs for training in ball sports. *Computers & Graphics*, *36*(6), 714-726. doi:10.1016/j.cag.2012.04.007
- Minsky, M. (1980). Telepresence. *OMNI Magazine*, 45-51.
- Mintzberg, H. (2014). *Manager-L'essentiel: Ce que font vraiment les managers... et ce qu'ils pourraient faire mieux*. Vuibert.
- Moran, K., Linares-Vásquez, M., Bernal-Cárdenas, C., & Poshyvanyk, D. (2015). Auto-completing bug reports for android applications. *10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering* (pp. 673-686). ACM.
- Morville, P. (2004). *User experience design*. Récupéré sur Ann Arbor: Semantic Studios LLC: <http://www.semanticstudios.com/publications/semantics/000029.php>
- Morville, P. (2005). *Ambient findability: What we find changes who we become*. O'Reilly Media, Inc.
- Morville, P., & Sullenger, P. (2010). Ambient findability: libraries, serials, and the internet of things. In *The serials librarian* (Vol. 58, pp. 33-38).
- Muratet, M., Torguet, P., Viallet, F., & Jessel, J. (2011). Évaluation d'un jeu sérieux pour l'apprentissage de la programmation. *Revue d'Intelligence Artificielle*, *25*(2), 175-202.

- Murphy, C. A., Coover, D., & Owen, S. V. (1989). Development and validation of the computer self-efficacy scale. *Educational and Psychological measurement*, 49(4), 893-899.
- Mütterlein, J. (2018). The Three Pillars of Virtual Reality? Investigating the Roles of Immersion, Presence, and Interactivity., (p. In Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences).
- Nakamura, J., & Csikszentmihalyi, M. (2014). The concept of flow. In M. Csikszentmihalyi, *Flow and the Foundations of Positive Psychology* (pp. 239-263). Springer Netherlands.
- Nemery, A., Brangier, E., & Kopp, S. (2011). First validation of persuasive criteria for designing and evaluating the social influence of user interfaces: justification of a guideline. In A. Marcus, *Design, User Experience, and Usability* (pp. 616-624). LNCS 6770.
- Nichols, S., Haldane, C., & Wilson, J. R. (2000). Measurement of presence and its consequences in virtual environments. *International Journal of Human-Computer Studies*, 52, 471-491.
- Nicolelis, M. A. (2012). Mind in motion. *Scientific American*, 307(3), 58-63.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. London: UK. Academic Press.
- Norman, D. A. (2004). Introduction to this special section on beauty, goodness, and usability. *Human-Computer Interaction*, 19(4), 311-318.
- Norman, D. A., & Draper, S. W. (1986). *User centered system design. New Perspectives on Human-Computer Interaction*. (Vol. 3). Hillsdale, NJ: L. Erlbaum Associates Inc.
- Novak, T. P., Hoffman, D. L., & Yung, Y. F. (2000). Measuring the customer experience in online environments: A structural modeling approach. *Marketing science*, 19(1), 22-42.
- Nowak, K. L., & Biocca, F. (2003). The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(5), 481-494.
- Nugier, A. (2009). Histoire et grands courants de recherche sur les émotions. *Revue électronique de psychologie sociale*, 4(4), 8-14.
- Nunnally, J. C. (1967). *Psychometric theory*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory*, (2nd ed.). (McGraw-Hill, Ed.)
- Oculus Best Practices*. (n.d.). Retrieved from [https://developer.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp\\_intro/](https://developer.oculus.com/documentation/intro-vr/latest/concepts/bp_intro/)
- Pallot, M., Eynard, R., Poussard, B., & Christmann, O. (2013). Augmented sport: exploring collective user experience. *Virtual Reality International Conference* (p. 8). New York: ACM. doi:10.1145/2466816.2466821
- Partala, T., & Surakka, V. (2004). The effects of affective interventions in human-computer interaction. *Interacting with computers*, 16(2), 295-309.

- Pekrun, R., Goetz, T., & Frenzel, A. C. (2005). *Achievement Emotions Questionnaire-Mathematics (AEQ-M). User's Manual*. Department of Psychology, University of Munich.
- Pekrun, R., Goetz, T., Frenzel, A. C., Barchfeld, P., & Perry, R. P. (2011). Measuring emotions in students' learning and performance: The Achievement Emotions Questionnaire (AEQ). *Contemporary Educational Psychology*, 36(1), 36-48.
- Peraya, D., & Campion, B. (2006). L'analyse des dispositifs hybrides: les effets d'un changement d'environnement virtuel de travail. D'un site Web à la plateforme Claroline. *Questions de pédagogie dans l'enseignement supérieur*. Louvain-la-Neuve.
- Pereira, R., Baranauskas, M. C., & da Silva, S. R. (2010). Social software building blocks: revisiting the honeycomb framework. *Information Society (i-Society) 2010 International Conference* (pp. 253-258). IEEE.
- Pfiftner, D., Hobbs, V., & Powers, D. (2003). A unified taxonomic framework for information visualization. *In Proceedings of the Asia-Pacific symposium on Information visualisation*. 24, pp. 57-66. Australian Computer Society, Inc.
- Philpot, A., Glancy, M., Passmore, P. J., Wood, A., & Fields, B. (2017). User experience of panoramic video in CAVE-like and head mounted display Viewing Conditions Experiences for TV and Online Video. *In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Experiences* (pp. 65-75). ACM.
- Piantanida, T., Boman, D. K., & Gille, J. (1993). Human perceptual issues and virtual reality. *Virtual Reality Systems*, 1(1), 43-52.
- Pillai, J. S., Schmidt, C., & Richir, S. (2013). Achieving presence through evoked reality. *Frontiers in Psychology*, 4(86), 1-13.
- Piolat, A., & Bannour, R. (2008). Emotions et affects: contribution de la psychologie cognitive. In P. Nagy, & D. Boquet, *Le sujet des émotions au Moyen Age* (pp. 53-84). Beauchesne.
- Plocher, T. A., Garg, C., & Chestnut, J. (1999). Connecting culture, user characteristics and user interface design. *Proceedings of the 8th International Conference on Human-Computer Interaction: Ergonomics and User Interfaces. I*, pp. 803-807. L. Erlbaum Associates Inc.
- Polcar, J., & Horejsi, P. (2013). Knowledge Acquisition and Cyber Sickness: A Comparison of VR Devices in Virtual Tours. *Science*.
- Polys, N. F., Kim, S., & Bowman, D. A. (2005). Effects of information layout, screen size, and field of view on user performance in information-rich virtual environments. *In Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology* (pp. 46-55). ACM.
- Porter, S. S., & Claycomb, C. (1997). The influence of brand recognition on retail store image. *Journal of product & brand management*, 6(6), 373-387.
- Ravaja, N., Saari, T., Turpeinen, M., Laarni, J., Salminen, M., & Kivikangas, M. (2006). Spatial presence and emotions during video game playing: Does it matter with

- whom you play? *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 15(4), 381-392.
- Reed, W. M., & Giessler, S. F. (1996). Prior computer-related experiences and hypermedia metacognition. *Computers in Human Behavior*, 11(3), 581-600.
- Regan, E. C., & Price, K. R. (1993). *Some side-effects of immersion virtual reality*. APRE Report 93R010. Defence Research Agency.
- Regan, E. C., & Price, K. R. (1994). The frequency of occurrence and severity of side-effects of immersion virtual reality. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 65(6), 527-530.
- Regan, E. C., & Ramsey, A. D. (1996). The efficacy of hyoscine hydrobromide in reducing side-effects induced during immersion in virtual reality. *Aviation, space, and environmental medicine*, 67(3), 222-226.
- Richard, P., Birebent, G., Coiffet, P., Burdea, G., Gomez, D., & Langrana, N. (1996). Effect of frame rate and force feedback on virtual object manipulation. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 5(1), 95-108.
- Richardson, A. E., Montello, D. R., & Hegarty, M. (1999). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory & cognition*, 27(4), 741-750.
- Riva, G., Davide, F., & IJsselsteijn, W. (2003). *Being there: Concepts, effects and measurements of user presence in synthetic environments*. IOS Press.
- Rizzo, A., Buckwalter, J. G., & Neumann, U. (1997). Virtual reality and cognitive rehabilitation: A brief review of the future. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*, 12(6), 1-15.
- Rizzo, A., Kenny, P., & Parsons, T. D. (2011). Intelligent Virtual Patients for Training Clinical Skills. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 8, 1-16.
- Roca, J. C., Chiu, C. M., & Martínez, F. J. (2006). Understanding e-learning continuance intention: An extension of the Technology Acceptance Model. *International Journal of human-computer studies*, 64(8), 683-696.
- Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of Innovations, 3rd edition*. New York, NY, USA: The Free Press.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 59, 1161-1178.
- Russell, J. A., & Barrett, L. F. (1999). Core affect, prototypical emotional episodes, and other things called emotion: dissecting the elephant. *Journal of personality and social psychology*, 76(5), 805.
- Sagardia, M., & Hulin, T. (2017, March). Evaluation of a penalty and a constraint-based haptic rendering algorithm with different haptic interfaces and stiffness values. (IEEE, Ed.) *Virtual Reality (VR)*, 64-73.
- Sagot, J. C., & Gomes, S. (2003). Intégration des facteurs humains dans la démarche de conception. Une approche ergonomique. *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, 191, 61-71.

- Sallnäs, E. L. (2005). Effects of communication mode on social presence, virtual presence, and performance in collaborative virtual environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(4), 434-449.
- Satyanarayanan, M., Bahl, P., Caceres, R., & Davies, N. (2009). The case for vm-based cloudlets in mobile computing. *IEEE pervasive Computing*, 8.
- Scapin, D., Senach, B., Trousse, B., & Pallot, M. (2012). User Experience: Buzzword or New Paradigm? *International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*. Valencia.
- Scherer, K. R. (2001). Appraisal considered as a process of multilevel sequential checking. In *Appraisal processes in emotion: Theory, methods, research* (Vol. 92, p. 57).
- Schlosser, A. E. (2003). Experiencing products in the virtual world: the role of goal and imagery in influencing attitudes versus purchase intentions. *Journal of consumer research*, 30(2), 184-198.
- Schnall, S., Hedge, C., & Weaver, R. (2012). The Immersive Virtual Environment of the digital fulldome: Considerations of relevant psychological processes. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70, 561-575.
- Schrader, P. G., & McCreery, M. (2008). The acquisition of skill and expertise in massively multiplayer online games. *Educational Technology Research and Development*, 56(5-6), 557-574.
- Schubert, T. W., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. (2001). The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 10, 266-281.
- Sheridan, T. B. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1), 120-126.
- Shin, D. (2018). Empathy and embodied experience in virtual environment: To what extent can virtual reality stimulate empathy and embodied experience? *Computers in Human Behavior*, 78, 64-73.
- Shin, D. H., & Kim, W. Y. (2008). Applying the technology acceptance model and flow theory to cyworld user behavior: implication of the web2.0 user acceptance. *CyberPsychology & Behavior*, 11(3), 378-382.
- Shin, D. H., Biocca, F., & Choo, H. (2013). Exploring the user experience of three-dimensional virtual learning environments. *Behaviour & Information Technology*, 32, 203-214.
- Singer, M. J., & Witmer, B. G. (1996). *Presence measures for virtual environments: Background & development*. Alexandria: Draft United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Skadberg, Y. X., & Kimmel, J. R. (2004). Visitors' flow experience while browsing a Web site: its measurement, contributing factors and consequences. *Computers in human behavior*, 20(3), 403-422.
- Slater, M. (1999). Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560-565.

- Slater, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3), 1-5.
- 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.
- Slater, M., Usoh, M., & Steed, A. (1994). Depth of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 3(2), 130-144.
- Sousa Santos, B., Dias, P., Pimentel, A., Baggerman, J. W., Ferreira, C., Silva, S., & Madeira, J. (2009). Head-mounted display versus desktop for 3D navigation in virtual reality: a user study. *Multimedia tools and applications*, 41(1), 161-181.
- 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, pp. 1138-1142. Los Angeles: CA: SAGE Publications.
- 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.
- Steuer, J. (1992). Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, 42(4), 73-93.
- Stone, M. A., & Desmond, J. (2007). *Fundamentals of marketing*. Routledge.
- Swenson, E. (2011). Overview of UX/Branding Process. In *Practical SharePoint 2010 Branding and Customization* (pp. 21-41).
- Tabachnik, B. G., & Fidell, S. L. (2007). Discriminant analysis. Using multivariate statistics. (P. E. Inc, Ed.) 201(3), 377-438.
- Takatalo, J., Häkkinen, J., Kaistinen, J., & Nyman, G. (2010). Presence, involvement, and flow in digital games. In *Evaluating user experience in games* (pp. 23-46). London: Springer.
- Thouvenin, I. M. (2009). *Interaction et connaissance: construction d'une expérience dans le monde virtuel (Doctoral dissertation)*. Université de Technologie de Compiègne.
- Thüring, M., & Mahlke, S. (2007). Usability, aesthetics and emotions in human-technology interaction. *International Journal of Psychology*, 42(4), 253-264.
- Toke, G. W. (2017). Des effets de la complaisance du hasard... dans le virtuel. *Revue de l'enfance et de l'adolescence*, 1, 69-84.
- Triclot, M. (2011). *Philosophie des jeux vidéo*. Paris: Zones.
- Uno, A., Takeda, N., Horii, A., Sakata, Y., Yamatodani, A., & Kubo, T. (2000). Effects of amygdala or hippocampus lesion on hypergravity-induced motion sickness in rats. *Acta oto-laryngologica*, 120(7), 860-865.
- Usoh, M., Catena, E., Arman, S., & Slater, M. (2000). Using presence questionnaires in reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 9, 497-503.

- Vanderdonckt, J., & Coyette, A. (2006). Vers un prototypage des interfaces graphiques incluant vraiment l'utilisateur final. *Paper presented at the Ergo IA. Bidart / Biarritz.*
- Västfjäll, D. (2003). The subjective sense of presence, emotion recognition, and experienced emotions in auditory virtual environments. *CyberPsychology & Behavior, 6*(2), 181-188.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly, 425-478.*
- Von Der Pütten, A. M., Klatt, J., Ten Broeke, S., McCall, R., Krämer, N. C., Wetzell, R., . . . Klatt, J. (2012). Subjective and behavioral presence measurement and interactivity in the collaborative augmented reality game TimeWarp. *Interacting with computers, 24*(4), 317-325.
- Vredenburg, K., Mao, J. Y., Smith, P. W., & Carey, T. (2002). A survey of user-centered design practice. *the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 471-478). ACM.
- Ward, R. D., & Marsden, P. H. (2003). Physiological responses to different WEB page designs. *International Journal of Human-Computer Studies, 59*, 199-212.
- Webster, J., & Martocchio, J. J. (1992). Microcomputer playfulness: Development of a measure with workplace implications. *MIS Quarterly, 16*, 201-226.
- Weibel, D., & Wissmath, B. (2011). Immersion in computer games: The role of spatial presence and flow. *International Journal of Computer Games Technology, 2011*, 6.
- Welch, R. B., Blackmon, T. T., Liu, A., Mellers, B. A., & Stark, L. W. (1996). The effects of pictorial realism, delay of visual feedback, and observer interactivity on the subjective sense of presence. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments, 5*(3), 263-273.
- White, R. W. (1959). Motivation reconsidered: The concept of competence. *Psychological review, 66*(5), 297.
- Wilson, J. R. (1996). Effects of participating in virtual environments: a review of current knowledge. *Safety science, 23*(1), 39-51.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1994). *Measuring immersion in virtual environments. (ARI Technical Report 1014)*. Alexandria: VA: U. S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: a presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 7*, 225-240.
- 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.
- Wolf, E. J., Harrington, K. M., Clark, S. L., & Miller, M. W. (2013). Sample Size Requirements for Structural Equation Models: An Evaluation of Power, Bias, and Solution Propriety. *Educational and Psychological Measurement, 76*(6), 913-934. doi:10.1177/0013164413495237

- Woods, D., & Dekker, S. (2000). Anticipating the effects of technological change: a new era of dynamics for human factors. *Theoretical issues in ergonomics science*, 1(3), 272-282.
- Wu, W., Arefin, A., Rivas, R., Nahrstedt, K., Sheppard, R., & Yang, Z. (2009). Quality of Experience in Distributed Interactive Multimedia Environments: Toward a Theoretical Framework. *ACM Multimedia*. Beijing, China: ACM.
- Yaacoub, F., Hamam, Y., & Abche, A. (2009). A Virtual Reality Simulator For Training Wrist Arthroscopic Surgery. *The International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*. Porto.
- Yogasara, T., Popovic, V., Kraal, B. J., & Chamorro-Koc, M. (2011). General characteristics of anticipated user experience (AUX) with interactive products. *Proceedings of IASDR2011: The 4th World Conference on Design Research: Diversity and Unity*, (pp. 1-11).
- Yoon, S. Y., Laffey, J., & Oh, H. (2008). Understanding usability and user experience of web-based 3D graphics technology. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 24(3), 288-306.
- Zeithaml, Z. A., Berry, L. L., & Parasuraman, A. (1996). The behavioral consequences of service quality. *The Journal of Marketing*, 31-46.
- Zhang, P., & Li, N. (2004). Love at First Sight or Sustained Effect? The Role of Perceived Affective Quality on Users' Cognitive Reactions to IT. *Proceedings of the International Conference on Information Systems (ICIS'04)*, (pp. 283-95). Washington, DC.
- Zhou, T., & Lu, Y. (2011). Examining mobile instant messaging user loyalty from the perspectives of network externalities and flow experience. *Computers in Human Behavior*, 27(2), 883-889.
- Zimmons, P., & Panter, A. (2003). The influence of rendering quality on presence and task performance in a virtual environment. *Virtual Reality* (pp. 293-294). IEEE.

# PRODUCTION PERSONNELLE



## PUBLICATIONS

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., Canac, G., Farin, F., & Richir, S. (2015). Vers un modèle de l'expérience utilisateur en environnement virtuel immersif : Une analyse de la littérature. *In Proceedings of the 27th Conference on Interaction Homme-Machine (IHM2015)* (p. 26). Toulouse: ACM.

Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments. *The International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33-48.

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O. & Richir, S. (2017). Expérience Utilisateur et Interactions Homme-Environnement Virtuel Immersif. *9 ème Colloque EPIQUE (EPIQUE 2017)*. Dijon.

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2017). A questionnaire to measure the User Experience. *In Proceedings of the 18th Virtual Reality International Conference (VRIC 2016)*. Laval: ACM.

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., & Richir, S. (2017). Effects on User Experience in an Edutainment Virtual Environment: Comparison Between CAVE and HMD. *In Proceedings of ACM European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE 2017)*. Umeå, Sweden: ACM.

Lecossier, A., Tcha-Tokey, K., & Richir, S. (2017). The user experience measurement: a challenge of the twenty-first century. *International Scientific and Practical Conference 175 years of the D.I Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM) and National Measurement System*". Saint Petersburg, Volume: Book of abstracts.

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O. & Richir, S. (2017). Effects of Interaction Level, Framerate, Field of View, 3D Content Feedback, Previous Experience on Subjective User eXperience and Objective Usability in Immersive Virtual Environment. *The International Journal of Virtual Reality*. 17(3), 27-51.



# ANNEXES



## Annexe 1 : Document de droit à l'image



Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et innovAtion

### Arts et Métiers Paris Tech

2 Boulevard du Ronceray

49035 Angers

Tél : 02 43 67 05 76

<http://lampa.ensam.eu/>

### AUTORISATION DE DROIT A L'IMAGE

Le laboratoire LAMPA (Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et innovAtion) est une structure pluridisciplinaire qui se répartie autour de 3 équipes de recherche. Ses thèmes de recherche touchent entre autres les procédés avancés de mise en forme, l'optique et le traitement du signal, la conception et l'intégration de systèmes de réalité virtuelle ou encore l'optimisation des processus de conception et d'innovation.

Pour mener à bien ses recherches, le LAMPA réalise des évaluations de technologies impliquant des utilisateurs.

Vous allez être filmé(e) dans le cadre d'une étude menée au sein du laboratoire par des chercheurs des Arts et Métiers ParisTech.

Les vidéos enregistrées au cours de cette session de tests seront analysées par les chercheurs afin d'évaluer l'expérience-utilisateur procurée par les technologies de réalité virtuelle.

#### Je soussigné

Prénom NOM : \_\_\_\_\_

Date et lieu de naissance : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Profession : \_\_\_\_\_

- Donne mon accord pour que mon image et ma voix soient enregistrées dans le cadre des sessions d'évaluations réalisées au sein du LAMPA.
- Autorise l'utilisation à des fins scientifiques de ces films par le LAMPA.

Fait à ----- Date -----

Signature

## Annexe 2 : Affiche de recrutement



**Faites avancer**  
**la Réalité Virtuelle**

Lieu de déroulement : SCOMAM, Ingénierium  
de Laval, 4 rue de l'Ermitage, 1er étage

Oculus  
Development Kit 2

**Venez participer  
à une expérimentation  
de recherche\*.**

**Contact : Katy (Doctorante)**  
**pi.laval@ensam.fr**

Dédommagement : oui  
Dates de l'expérience : 01/02/16 - 31/03/16  
Cloture du recrutement : 31/03/16  
Objet de l'étude : Vivre l'expérience d'un Environnement Virtuel  
Description de l'expérience : Jeu consistant à viser et tirer  
sur des créatures maléfiques pour sauver votre personnage.

Utilisation de L'oculus Rift  
Condition : Avoir plus de 18 ans  
Personne à contacter :  
Tcha-Tokey Katy  
+33 243670576  
pi.laval@ensam.fr

\* Durée : 45 mn

## Annexe 3 : Questionnaire d'identification

Numéro du participant	Date	Facteur (LCV, FI, NI, FC3D, EP)	Condition (VA/VC)
	/ /		

### Questionnaire d'identification

Nous vous invitons à participer à l'évaluation de votre expérience dans un environnement virtuel.

Cette expérimentation préservera votre anonymat conformément à la loi n°78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés.

Les informations sollicitées dans ce questionnaire nous serviront à préciser votre profil en tant qu'utilisateur de logiciels grand public. Elles resteront confidentielles.

### Informations Personnelles

<b>Nom :</b>	<input type="text"/>	<b>Sexe :</b>	<b>F</b> <input type="checkbox"/>	<b>M</b> <input type="checkbox"/>
<b>Prénom :</b>	<input type="text"/>	<b>E-mail :</b>	<input type="text"/>	
<b>Date de naissance :</b>	<input type="text"/>			

#### Comment avez-vous entendu parler de cette expérimentation ?

<b>Flyer</b>	<input type="checkbox"/>
<b>Affiche</b>	<input type="checkbox"/>
<b>Mail reçu par une institution (UCO, IUT, AFPA, CLARTE, ...).</b>	Si oui, précisez laquelle :
<b>Présentation orale par l'organisateur</b>	<input type="checkbox"/>
<b>Par une connaissance</b>	<input type="checkbox"/>
<b>Autres, précisez :</b>	

## Connaissances Générales

Dernier diplôme obtenu (Niveau – spécialité ; ex : Master - IVI) :

--

Diplôme en cours de préparation : **OU** Profession :

--	--

## Compétences en Programmation Informatique et Réalité Virtuelle

1. Avez-vous des connaissances en programmation informatique ?

Aucune connaissances	<input type="checkbox"/>	Excellentes connaissances				
----------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------

2. Avez-vous des connaissances en langage de programmation graphique (par exemple par l'utilisation de bloc dans labview ou simulink)?

Aucune connaissances	<input type="checkbox"/>	Excellentes connaissances				
----------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------

3. Avez-vous des connaissances en programmation par du code textuel (par exemple, C, C++, Java, ...)?

Aucune connaissances	<input type="checkbox"/>	Excellentes connaissances				
----------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------

4. Imaginons que l'instruction suivante est écrite dans un pseudo langage de programmation, comment s'appelle la fonction ?

Tirer (monstre, balle, 2) ;

A. Tirer	B. <i>monstre</i>	C. <i>balle</i>	D. 2	E. Je ne sais pas
<input type="checkbox"/>				

5. Dans la même instruction ci-dessus, combien y a-t-il de paramètres ?

A. 1	B. 2	C. 3	D. 4	E. Je ne sais pas
<input type="checkbox"/>				

**6. Quels dispositifs de réalité virtuelle avez-vous déjà utilisés et à quelle fréquence ?**

	Jamais	Peu	Parfois	Souvent	Très souvent
<b>Casque de réalité virtuelle</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Manette de jeu</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Joystick</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Kinect</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Gant de données</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Leap Motion</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Bras à retour d'effort</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Autres, précisez :</b>					

**7. Quelles activités informatiques utilisant la 3D pratiquez-vous ?**

	Jamais	Peu	Parfois	Souvent	Très souvent
<b>Jeux vidéo à moteur 3D</b>	<input type="checkbox"/>				
<b>Logiciels de CAO</b> (Autocad Architectural Desktop, sketchup, Catia,...)	<input type="checkbox"/>				
<b>Logiciels de dessin, modeling</b> (3DS max, Maya, ...)	<input type="checkbox"/>				
<b>Logiciels de création de scènes interactives et temps réel</b> (Virtools, Unity, OpenScene Graph, Orge, ...)	<input type="checkbox"/>				
<b>Autres, précisez :</b>					

## Annexe 4 : Exemple de fichiers log de l'utilisateur N° 110

Name : performances\_22\_03\_2016\_10\_16

Date of the start (FR\_fr format) : 22/03/2016 10:16

Date of the end (FR\_fr format) : 22/03/2016 10:17

-----

---

User : 22\_03\_2016\_10\_13

---

**\*\*Facteurs sélectionnés\*\***

facteur\_lcv : 106°

facteur\_fi : 70 FPS

facteur\_ni : Manette

facteur\_fc3d : Minimap

facteur\_ep : Non Expérimenté en RV

**\*\*Performances obtenues\*\***

Niveau concerné : 1

Nombre d'echec dans le niveau : 0

Temps passé dans le niveau : 31.68781 secondes

Score obtenu dans le niveau : 6

---

User : 22\_03\_2016\_10\_15

---

**\*\*Facteurs sélectionnés\*\***

facteur\_lcv : 106°

facteur\_fi : 70 FPS

facteur\_ni : Manette

facteur\_fc3d : Minimap

facteur\_ep : Non Expérimenté en RV

**\*\*Performances obtenues\*\***

Niveau concerné : 2

Nombre d'echec dans le niveau : 0  
Temps passé dans le niveau : 94.17471 secondes  
Score obtenu dans le niveau : 10

---

User : 22\_03\_2016\_10\_16

---

**\*\*Facteurs sélectionnés\*\***

facteur\_lcv : 106°  
facteur\_fi : 70 FPS  
facteur\_ni : Manette  
facteur\_fc3d : Minimap  
facteur\_ep : Non Expérimenté en RV

**\*\*Performances obtenues\*\***

Niveau concerné : 3  
Nombre d'echec dans le niveau : 0  
Temps passé dans le niveau : 77.69104 secondes  
Score obtenu dans le niveau : 10

---

User : 22\_03\_2016\_10\_17

---

**\*\*Facteurs sélectionnés\*\***

facteur\_lcv : 106°  
facteur\_fi : 70 FPS  
facteur\_ni : Manette  
facteur\_fc3d : Minimap  
facteur\_ep : Non Expérimenté en RV

**\*\*Performances obtenues\*\***

Niveau concerné : 4  
Nombre d'echec dans le niveau : 0  
Temps passé dans le niveau : 85.91204 secondes  
Score obtenu dans le niveau : 2

--->>>Les 5 minutes de jeu ont été atteintes

**Annexe 5 : Coefficient de corrélation de Pearson des 83 items du questionnaire IVEQ**

**Tableau CCP**

<b>Item</b>	<b>CCP</b>
Item1	0,233*
Item2	0,491**
Item3	0,482**
Item4	0,369**
Item5	0,535***
Item6	0,491**
Item7	0,317**
Item8	0,344**
Item9	0,520***
Item10	0,516***
Item12	0,149*
Item13	0,302**
Item14	0,342**
Item15	0,301**
Item16	0,593***
Item17	0,390***
Item18	0,226*
Item19	0,387**
Item20	0,640**
Item21	0,187*
Item22	0,501***

*Note. CCP : Coefficient de Corrélation de Pearson ; \*Corrélation faible ; \*\*Corrélation modérée ; \*\*\*Corrélation forte*

**Tableau CCP (suite)**

<b>Item</b>	<b>CCP</b>
Item23	0,493**
Item24	0,356**
Item25	0,527***
Item26	0,462***
Item27	0,593***
Item28	0,475**
Item29	0,286*
Item30	0,360**
Item31	0,653***
Item32	0,724***
Item33	0,454**
Item37	0,737***
Item38	0,111*
Item39	0,668***
Item40	0,650***
Item41	0,550***
Item42	0,116*
Item43	0,249*
Item44	0,384**
Item45	0,437**
Item46	0,472**
Item47	0,458**
Item48	0,529***
Item49	0,332**
Item50	0,163*
Item51	0,585***
Item52	0,487**
Item53	0,485**
Item54	0,354**
Item55	0,360**
Item56	0,489**
Item57	0,417**
Item58 A	0,673***
Item58 B	0,603***

*Note. CCP : Coefficient de Corrélation de Pearson ; \*Corrélation faible ; \*\*Corrélation modérée ; \*\*\*Corrélation forte*

**Tableau CCP (suite)**

<b>Item</b>	<b>CCP</b>
Item58 C	0,550 <sup>***</sup>
Item59 A	0,281 <sup>*</sup>
Item59 B	0,453 <sup>**</sup>
Item59 C	0,289 <sup>*</sup>
Item60 A	0,367 <sup>**</sup>
Item60 B	0,488 <sup>**</sup>
Item60 C	0,426 <sup>**</sup>
Item61 A	0,461 <sup>**</sup>
Item61 B	0,515 <sup>***</sup>
Item61 C	0,290 <sup>*</sup>
Item62	0,444 <sup>**</sup>
Item63	0,504 <sup>***</sup>
Item64	0,426 <sup>**</sup>
Item65	0,322 <sup>**</sup>
Item66	0,281 <sup>*</sup>
Item67	0,471 <sup>**</sup>
Item68	0,490 <sup>**</sup>
Item69	0,492 <sup>**</sup>
Item70	0,445 <sup>**</sup>
Item71	0,573 <sup>***</sup>
Item72	0,595 <sup>***</sup>
Item73	0,567 <sup>***</sup>
Item74	0,453 <sup>**</sup>
Item75	0,429 <sup>**</sup>
Item76	0,459 <sup>**</sup>
Item77	0,424 <sup>**</sup>
Item78	0,280 <sup>*</sup>
Item79	0,236 <sup>*</sup>

*Note. CCP : Coefficient de Corrélation de Pearson ; \*Corrélation faible ; \*\*Corrélation modérée ; \*\*\*Corrélation forte*

## Annexe 6 : Questionnaire d'expérience utilisateur

Listes des items, numéro de l'ancienne et de la nouvelle version et sous-échelles du questionnaire final après validation.

N° v2	Items	Subscale	N° v1
1	Mes interactions avec l'environnement virtuel me semblaient naturelles.	<i>Presence</i>	2
2	Les aspects visuels de l'environnement virtuel m'invitaient à m'y impliquer.	<i>Engagement</i>	3
3	Les périphériques (manette et/ou clavier) permettant mon mouvement dans l'environnement virtuel me semblaient naturels.	<i>Presence</i>	4
4	J'étais en mesure d'explorer activement l'environnement virtuel de façon visuelle.	<i>Presence</i>	5
5	La sensation de déplacement à l'intérieur de l'environnement virtuel était réaliste.	<i>Engagement</i>	6
6	À une distance proche, je pouvais bien examiner les objets.	<i>Presence</i>	7
7	Je pouvais examiner les objets sous différents angles.	<i>Presence</i>	8
8	J'étais impliqué(e) dans l'expérience vécue dans l'environnement virtuel.	<i>Engagement</i>	9
9	En termes d'interactions et de déplacements dans l'environnement virtuel, je me suis senti(e) compétent(e) à la fin de l'expérience.	<i>Presence</i>	10
10	Je suis parvenu(e) à me concentrer sur les tâches requises plutôt que sur les périphériques d'interaction (manette et/ou clavier).	<i>Presence</i>	13
11	J'arrivais à identifier correctement les sons produits dans l'environnement virtuel.	<i>Presence</i>	14
12	J'arrivais à localiser correctement les sons produits dans l'environnement virtuel.	<i>Presence</i>	15
13	Je me sentais stimulé(e) par l'environnement virtuel.	<i>Immersion</i>	16
14	Il m'est arrivé d'être tellement absorbé(e) dans l'environnement virtuel que je n'étais plus conscient(e) des choses qui pouvaient se passer autour de moi.	<i>Immersion</i>	17
15	Il m'est arrivé d'être tellement absorbé(e) dans l'environnement virtuel que j'avais l'impression d'être à l'intérieur du jeu plutôt qu'en train de manœuvrer des manettes de jeu et de regarder un écran.	<i>Immersion</i>	19
16	Physiquement, je me sentais bien dans l'environnement virtuel.	<i>Immersion</i>	20

N° v2	Items (suite)	Subscale	N° v1
17	Il m'est arrivé(e) d'être absorbé(e) dans le jeu à un point tel que j'en ai perdu la notion du temps.	<i>Immersion</i>	22
18	Je sentais que je contrôlais parfaitement mes actions.	<i>Flow</i>	23
19	À chaque étape, je savais ce que je devais faire.	<i>Flow</i>	24
20	J'avais le sentiment de bien contrôler la situation.	<i>Flow</i>	25
21	Le temps semblait s'écouler de façon différente de d'habitude.	<i>Flow</i>	26
22	J'avais l'impression que le temps passait rapidement.	<i>Flow</i>	27
23	Je perdais la notion du temps.	<i>Flow</i>	28
24	Je n'étais pas préoccupé(e) par ce que les autres pouvaient penser de moi.	<i>Flow</i>	30
25	J'avais le sentiment de vivre un moment enthousiasmant.	<i>Flow</i>	31
26	Cette expérience dans l'environnement virtuel me procurait beaucoup de bien-être.	<i>Flow</i>	32
27	Quand j'évoque cette expérience dans l'environnement virtuel, je ressens une émotion que j'ai envie de partager.	<i>Flow</i>	33
28	J'ai apprécié être dans cet environnement virtuel.	<i>Emotion</i>	37
29	C'était tellement excitant à un point tel que je pourrais rester dans l'environnement virtuel pendant des heures.	<i>Emotion</i>	39
30	J'ai apprécié l'expérience à un point tel que je me sens plein(e) d'énergie.	<i>Emotion</i>	40
31	Je me suis senti(e) nerveux(se) dans l'environnement virtuel.	<i>Emotion</i>	41
32	J'avais envie de me distraire afin de réduire mon anxiété.	<i>Emotion</i>	44
33	Pendant que j'étais dans l'environnement virtuel, j'ai perdu le fil de mes pensées.	<i>Emotion</i>	45
34	Les périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) étaient très ennuyeux.	<i>Emotion</i>	46
35	Lorsque mes actions fonctionnaient, je ressentais une montée d'émotion positive.	<i>Emotion</i>	47
36	Lorsque j'utilisais ces périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier), je trouvais le temps long.	<i>Emotion</i>	48
37	J'ai apprécié le défi que représentait l'apprentissage des périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle.	<i>Emotion</i>	49
38	J'ai apprécié avoir affaire aux périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de l'environnement virtuel.	<i>Emotion</i>	51

N° v2	Items (suite)	Subscale	N° v1
39	J'étais sûr(e) de moi lorsque je sélectionnais des objets dans l'environnement virtuel.	<i>Skill</i>	52
40	J'étais sûr(e) de moi lorsque je déplaçais le viseur dans l'environnement virtuel.	<i>Skill</i>	53
41	J'étais sûr(e) de moi lorsque j'utilisais la manette et/ou le clavier pour me déplacer dans l'environnement.	<i>Skill</i>	54
42	Je suis sûr(e) de pouvoir comprendre les termes/mots relatifs aux périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de l'environnement virtuel.	<i>Skill</i>	55
43	Je suis sûr(e) de pouvoir acquérir des compétences avancées dans une application de réalité virtuelle utilisant le casque Oculus.	<i>Skill</i>	56
44	Je suis sûr(e) de pouvoir décrire le fonctionnement des périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier, joystick, kinect, ...) d'un environnement de réalité virtuelle.	<i>Skill</i>	57
45	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est Pas pratique/ Pratique.	<i>Judgement</i>	58 A
46	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est Confus/ Clair.	<i>Judgement</i>	58 B
47	Personnellement, je dirais que cet environnement virtuel est Incontrôlable/ Maîtrisable.	<i>Judgement</i>	58 C
48	J'ai trouvé que cet environnement virtuel était Ennuyeux/ Enthousiasment.	<i>Judgement</i>	59 B
49	J'ai trouvé cet environnement virtuel Amateur/ Professionnel	<i>Judgement</i>	60 A
50	J'ai trouvé cet environnement virtuel De mauvais goût/ De bon goût	<i>Judgement</i>	60 B
51	J'ai trouvé cet environnement virtuel Non présentable/ Présentable	<i>Judgement</i>	60 C
52	J'ai trouvé que cet environnement virtuel est Laid/ Beau	<i>Judgement</i>	61 A
53	J'ai trouvé que cet environnement virtuel est Désagréable/ Agréable	<i>Judgement</i>	61 B
54	Je me suis senti(e) fatigué(e) durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	62

N° v2	Items (suite)	Subscale	N° v1
55	J'ai ressenti des maux de tête durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	63
56	J'ai ressenti une fatigue visuelle durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	64
57	J'ai remarqué une augmentation de ma salivation durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	65
58	J'ai eu des nausées dans l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	67
59	J'ai eu une impression de lourdeur dans la tête durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	68
60	Je me suis senti(e) étourdi(e) lorsque j'ouvrais les yeux durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	69
61	J'ai ressenti des vertiges durant mon interaction avec l'environnement virtuel.	<i>Experience consequence</i>	70
62	Si j'utilise de nouveau le même environnement virtuel, mon interaction avec l'environnement sera claire et compréhensible pour moi.	<i>Adoption Technologie</i>	71
63	J'arriverai aisément à acquérir les compétences requises pour utiliser cet environnement virtuel.	<i>Adoption Technologie</i>	72
64	Faire fonctionner à nouveau cet environnement virtuel sera facile pour moi.	<i>Adoption Technologie</i>	73
65	Utiliser ces périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle est une mauvaise idée.	<i>Adoption Technologie</i>	74
66	Les périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle pourrait rendre mon travail plus intéressant.	<i>Adoption Technologie</i>	75
67	J'aimerais bien utiliser ces périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle dans mon travail.	<i>Adoption Technologie</i>	76
68	J'ai les ressources nécessaires pour utiliser ces périphériques d'interaction (casque Oculus, manette et/ou clavier) de réalité virtuelle.	<i>Adoption Technologie</i>	77
69	À votre avis, quels ont été les points positifs de votre expérience ?		80
70	À votre avis, quels ont été les points négatifs de votre expérience ?		81

N° v2	Items (suite)	Subscale	N° v1
71	Avez-vous des suggestions pour améliorer cet environnement de réalité virtuelle ?		82

## Annexe 7 : Indications sur la manette du cave

# CAVE

Viser



OK



Non OK

Sélectionner



Bouton A

Annexe 8 : Indications sur le casque de RV mobile

# Casque

Viser



Sélectionner



Pour commencer, un indice :

Chercher le parchemin



Fermé



Viser-le pour l'ouvrir

## Annexe 9 : Test de connaissance de l'application King Tut VR2

### TEST 1

1. Before the *excavation* begins, archaeologists write a *research* design.

When is the excavation research design written?

- a) Before the excavation
- b) Before the excavation begins
- c) During the excavation

2. Archaeologists *start researching* on the top layer of the excavation area and work their way down.

Where does the archeologist start researching?

- a) On their way down
- b) On the bottom layer of the excavation area
- c) On the top layer of the excavation area

3. Multiple tombs await discovery in Egypt's *Valley of the Kings*.

Where are the multiple tombs awaiting discovery?

- a) In the city of Valley
- b) In the city of Kings
- c) In the Valley of the Kings

4. The Ancient Egypt exhibit has been revived under the Exposition Center sponsorship.

Who sponsors the Ancient Egypt exhibit?

- a) The Exposition Center
- b) The ancient Egyptians
- c) The revived exposition

5. The ancient Egyptians might have sealed doors against intruders and robberies.

What do the ancient Egyptians do against intruders and robberies?

- a) They rob them
- b) They seal doors

c) They open doors

## TEST 2

1. En quelle année Howard Carter commence-t-il ses recherches en Egypte sur la célèbre tombe d'un pharaon ?

- 1922
- 1902
- 1942
- Je ne sais pas.

2. Où commencent les fouilles d'Howard Carter ?

- À Londres.
- Au milieu de la vallée des rois.
- Dans les fonds sous-marins du Nil.
- Je ne sais pas.

3. Qui sponsorise les recherches d'Howard Carter ?

- Le roi Mérenptah.
- Howard Carter lui-même.
- Lord Carnarvon.
- Je ne sais pas.

4. Que recherche Howard Carter et son équipe dans la vallée des rois ?

- La tombe d'Anubis.
- La tombe de Ramsès V.
- La tombe du roi Toutankhamon.
- Je ne sais pas.

5. Pour quelle raison les égyptiens de l'antiquité scellaient les portes, les coffres et les pots, des lieux sacrés ou des chambres funéraires ?

- Pour empêcher les morts de sortir.
- Pour préserver et protéger par la magie leur contenu.
- Pour se cacher des ennemies.
- Je ne sais pas.





# CONCEPTION ET EVALUATION DE L'EXPERIENCE UTILISATEUR EN ENVIRONNEMENT VIRTUEL IMMERSIF

## RESUME :

La réalité virtuelle, jusqu'alors réservée à des professionnels, poursuit son développement avec la mise sur le marché du grand public, de périphériques (e.g., Oculus) et d'applications (e.g., Star Wars : Jedi Challenges) dit « immersifs ». Pour autant, la littérature ne recense que peu de modèles et d'outils faisant référence à l'expérience utilisateur ou User eXperience (UX) en Environnement Virtuel Immersif (EVI), et les quelques modèles et outils existants ne considèrent pas l'ensemble des composants de l'UX. Cette thèse vise à proposer et valider un modèle holistique d'UX adapté aux EVI (objectif 1), à construire et valider un questionnaire d'UX opérationnalisant le modèle (objectif 2) et à utiliser le questionnaire validé dans le cadre d'une entreprise internationale, editrice d'applications immersives dans le domaine ludo-éducatif (objectif 3). Le modèle « Immersive Virtual Experience Model » (IVEM) que nous proposons est multidimensionnel. En effet, il regroupe non seulement les facteurs intrinsèques à l'EVI (i.e., largeur du champ visuel, fréquence d'image, niveau d'interactivité, feedback du contenu 3D) et les facteurs propres à l'utilisateur (i.e., expérience précédente) impactant l'UX, mais aussi les composants caractérisant l'UX référencés dans la littérature (i.e., présence, immersion, engagement, flow, utilisabilité, compétences, émotions, conséquences de l'expérience, jugement, adoption de la technologie). Le modèle IVEM validé *via* cinq études expérimentales confirme les effets des facteurs sur les composants déjà identifiés dans la littérature et fait apparaître de nouvelles relations entre les composants jusqu'alors non démontrées. Notre questionnaire « Immersive Virtual Experience Questionnaire » (IVEQ) opérationnalise les dix composants de notre modèle, à travers des items provenant de questionnaires validés et répertoriés dans la littérature. Le questionnaire IVEQ validé à travers une étude expérimentale conduite sur 152 participants, est composé de 68 items : 9 items de présence, 3 items d'engagement, 5 items d'immersion, 10 items de flow, 11 items d'émotion, 6 items de compétence, 9 items de jugement, 8 items relatifs aux conséquences de l'expérience et 7 items concernent l'adoption de la technologie. Le questionnaire validé a été expérimenté chez un éditeur de solutions immersives, l'entreprise EON Reality, pour assister la conception de l'application ludo-éducative King Tut VR2, qui mobilise deux périphériques de réalité virtuelle : le casque VRONE et la salle immersive iCube.

**Mots clés :** Environnement Virtuel Immersif ; Evaluation ; Expérience utilisateur ; Questionnaire d'UX ; Modèle d'UX.

## DESIGN AND EVALUATION OF THE USER EXPERIENCE IN IMMERSIVE VIRTUAL ENVIRONMENT

### ABSTRACT:

Virtual Reality has until recently been mostly dedicated to experts. It is now pursuing its development towards the general public with the launch of new devices (e.g., Oculus) and immersive applications (e.g., Star Wars: Jedi Challenges). However, only few User eXperience (UX) models and tools are identified for Immersive Virtual Environments (IVE) in the scientific literature. And these few existing models and tools do not consider all the relevant UX components. This thesis aims to propose and validate a holistic UX model adjusted to IVE (objective 1), to build and validate a UX questionnaire that operationalizes the model (objective 2) and to use the validated questionnaire in an international company context, specifically an immersive applications editor in the field of edutainment (objective 3). The « Immersive Virtual Experience Model » (IVEM) model that we propose is multidimensional. Indeed, it combines not only IVE intrinsic factors (i.e., field of view, framerate, interactive level, 3D content feedback) and user intrinsic factors (i.e., previous experience) but also components from the scientific literature that characterizes the UX (i.e., presence, immersion, engagement, flow, usability, skills, emotions, experience consequences, judgement, technology adoption). The IVEM model was validated *via* five experimental studies. It confirms the effects of factors on components already identifies in the scientific literature as well as revealing new relations between components that were not demonstrated until then. Our « Immersive Virtual Experience Questionnaire » (IVEQ) questionnaire operationalizes the ten components of our model through items originating from validated and reported questionnaires in the scientific literature. The IVEQ questionnaire was validated through an experimental study conducted on 152 participants. It now comprises 68 items: 9 items for presence, 3 items for engagement, 5 items for immersion, 10 items for flow, 11 items for emotion, 6 items for skill, 9 items for judgement, 8 items related to experience consequences and 7 items refers to technology adoption. The validated questionnaire was experimented with an immersive solutions editor, specifically the EON Reality company, in order to assist the design of the edutainment application King Tut VR2 that can be used via two virtual reality devices: the VRONE headset and the immersive room iCube.

**Keywords:** Immersive Virtual Environment; Evaluation; User Experience; UX Questionnaire; UX Model.