HAL
open science

Réponse Réaliste en Réalité Virtuelle

Alexis Paljic

To cite this version:

Alexis Paljic. Réponse Réaliste en Réalité Virtuelle. Synthèse d'image et réalité virtuelle [cs.GR]. Sorbonne Université / Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2018. tel-01858478

HAL Id: tel-01858478

https://hal.science/tel-01858478v1

Submitted on 20 Aug 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.

Université Pierre et Marie Curie

Mémoire d'

Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité Sciences de l'Ingénieur

Réponse Réaliste en Réalité Virtuelle

présenté par

Alexis Paljic

Soutenu publiquement le 2 mars 2018 devant le jury composé de

Catherine Pelachaud, Professeur	Examinatrice
Benoît Bardy, Professeur	Rapporteur
Jean-Marie Burkhardt, Directeur de Recherches	Examinateur
Pierre de Loor, Professeur	Rapporteur
Daniel Mestre, Directeur de Recherche CNRS	Rapporteur
Jean-Louis Vercher, Directeur de Recherche CNRS	Examinateur

Table des matières

1 Introduction **11**

I Contexte et Définitions **13**

2 Une Terminologie de la Réponse Réaliste **15**
2.1 Immersion 15
2.2 Fidélité 15
2.3 Présence 16
2.4 Validité Ecologique 18
2.5 Transfert 19
2.6 Synthèse 19

3 Conception d'environnements virtuels pour la réponse réaliste **21**
3.1 Modèles Formels 21
3.2 Recommandations d'usages et Heuristiques 22
3.3 Bases de connaissances 23
3.4 Méthodes d'évaluation de la Réponse Réaliste 24
3.5 Synthèse 25

4 Etat de l'art de la Comparaison entre Réel et Virtuel **27**
4.1 Classification des activités 27
4.2 Comparaisons entre réel et virtuel 28
4.2.1 Niveau Perceptif 28
4.2.2 Niveau Psychomoteur 28
4.2.3 Niveau Cognitif 31
4.2.4 Niveau Interpersonnel 31
4.3 Synthèse 32

II Travaux de Recherche **35**

5 Apparence visuelle des matériaux **39**
5.1 Contexte : Rendu Predictif et Réalité Virtuelle 39
5.2 Projet Lumière Interaction Matériaux Aspect 40
5.3 Modèles de matériaux 41
5.4 Etalonnage de la chaîne d'affichage 42
5.5 Matériau étudié : une peinture automobile 42
5.6 Etude perceptive 43
5.6.1 Modèle de peinture à paillettes d'aluminium 43
5.6.2 Tâche de comparaison réel-virtuel 44

5.7 Résultat : une correspondance des métriques 46
5.8 Discussion 49

6 Taille et Forme des Objets **51**
6.1 Méthode de Génération des Stimuli Visuels en EV 51
6.2 Expérience de comparaison visuelle de la taille d'objets réels et virtuels 52
6.2.1 Méthode 53
6.2.2 Résultats 54
6.3 Conclusion 56

7 Geste de Manipulation **59**
7.1 Contexte : Interaction par gestes définis par l'utilisateur 59
7.2 Expérience 1 : Stabilité des gestes au regard de l'affordance et la colocalisation . 61
7.2.1 Variables indépendantes 61
7.2.2 Mesures 62
7.2.3 Résultats 62
7.3 Expérience 2 : Stabilité des gestes au regard de la rétroaction et de la fatigue . . 65
7.3.1 Tâche 65
7.3.2 Variables indépendantes 66
7.3.3 Mesures 67
7.3.4 Résultats 67
7.4 Discussion 69

8 Coopération Homme-Robot **71**
8.1 Co-présence homme-robot 71
8.1.1 Tâche 72
8.1.2 Implémentation en Réel et Virtuel 72
8.1.3 Variables indépendantes : Distance homme-robot, Environnement Réel ou Virtuel 73
8.1.4 Mesures : questionnaires et mesures physiologiques 74
8.1.5 Résultats 75
8.2 Coopération homme-robot 76
8.2.1 Tâche 77
8.2.2 Implémentation en réel et virtuel 77
8.2.3 Variables Indépendantes 78
8.2.4 Mesures 79
8.2.5 Résultats 79
8.3 Synthèse 81

9 Synthèse et Perspectives **83**
9.1 Synthèse des Résultats 83
9.2 Perspectives 85
9.3 Classification des aptitudes de Fleishman 97
9.4 Tableaux des résultats de Comparaisons Réel - Virtuel 97

Résumé

Le contexte de ces travaux est celui de la simulation en environnements virtuels immersifs d'activités humaines réelles. Je m'intéresse à la *réponse réaliste* de l'humain en environnement virtuel que je définis comme la similitude du comportement humain entre une activité réalisée en environnement virtuel et l'activité réelle. Je désigne par *immersion* la nature des interfaces proposées par un système de réalité virtuelle. J'expose dans ce document mes travaux dont l'objet est de chercher les modalités d'immersion qui favorisent la réponse réaliste de l'utilisateur. La réponse réaliste est une question centrale à l'étude de l'activité humaine dans le cadre d'activités écologiques, pour lesquelles le caractère prédictif de la réalité virtuelle est la raison même de son usage : conception d'objets ou de postes de travail avant l'existence de prototypes physiques, évaluation objective de l'activité dans le contexte thérapeutique. Ma méthode de recherche est basée sur la comparaison entre le réel et le virtuel, sur des critères objectifs et subjectifs de l'activité. Ma contribution est d'une part d'établir les descripteurs de l'activité pour lesquels la réponse est réaliste, ceux pour lesquels elle ne l'est pas, et d'autre part en explorer les raisons et donner des pistes d'amélioration. J'aborde quatre activités de nature différentes : l'observation de matériaux, l'observation de la taille et la forme d'objets, le geste de manipulation d'objets et la coopération homme-robot.

Abstract

The context of this work is the simulation of real human activities in immersive virtual environments. I am interested in the question of human *realistic response* in virtual environments which i define as the similarity of human behavior in an activity that is performed in a virtual context, compared to the real activity. I point out *immersion* as the nature of the interfaces of the virtual reality system. This document is a synthesis of my work whose objective is to seek immersion modalities that enable realistic response. Realistic response is a central question to the study of human ecological activites, for which the predictive nature of virtual reality is the very reason for its use : the design of objects or working stations before the existence of actual prototypes, or the objective evaluation of the activity in the therapeutic context. My research method is based on the comparison between the virtual and the real, using objective and subjective criteria. My contribution is to establish the descriptors of human activity for which human response is realistic, those for which it is not, and secondly explore the reasons for these results and open research towards potential solutions. I present four activities : observation of materials, observation of shape and size of objects, gestures when manipulating objects, and finally human-robot cooperation.

Remerciements

Je remercie Daniel Mestre et Pierre de Loor pour leurs conseils et leur disponibilité. Je remercie mes collègues Fabien Moutarde, Arnaud de la Fortelle, Philippe Fuchs, Christine Vignaud et Christophe Kotfila pour leur rôle dans la constitution d'un environnement de recherche motivant et agréable. J'adresse également mes plus sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir évalué ce travail. Enfin, je remercie mes proches pour leur soutien sans faille.

Préambule

Ce mémoire synthétise mes travaux sur le thème de la réponse réaliste, il mobilise des travaux effectués dans le contexte de 4 projets de recherche et 4 thèses. Je décris mes responsabilités de recherche et d'encadrement sur d'autres thèmes ainsi que mes perspectives de recherche dans les documents soumis en pièces jointes de ce mémoire.

Chapitre 1

Introduction

Le comportement humain réaliste dans les simulations de réalité virtuelle est une question centrale lorsque la réalité virtuelle est utilisée comme outil prédictif. L'usage de la réalité virtuelle en tant qu'outil prédictif relève d'un pari : celui de considérer que le comportement humain lors d'activités en environnement virtuel est représentatif de tout ou partie de son comportement lors de l'activité réelle correspondante. Par *réponse réaliste*, je désignerai la similitude du comportement humain entre une activité en virtuel et son équivalent réel. Comment s'assurer qu'un système de RV permet cette réponse réaliste ? Sinon tous, quels domaines du comportement peuvent être correctement représentés ? Développer cette connaissance est nécessaire à la conception d'environnements virtuels destinés à prédire ou évaluer le comportement humain. Dans mes travaux, j'aborde cette question du point de vue du rôle de l'*Immersion* sur la réponse réaliste. La définition que je mobilise pour le terme *immersion* est la suivante : la nature des interfaces du système de réalité virtuelle. Cette définition ne désigne pas un ressenti de l'utilisateur, mais bien les caractéristiques du système de réalité virtuelle. L'objectif de maîtriser la réponse réaliste en réalité virtuelle est un problème très large : chaque activité humaine pose un nouveau problème du point de vue de sa simulation, les domaines d'applications et les composantes du comportement étudiées sont très variés, les usagers diffèrent les uns des autres. De ce fait, la littérature scientifique abordant la question de la réponse réaliste est assez diffuse, et ne relève pas de modèles, théories, ou méthodes d'évaluation unifiées.

Ce document est organisé en deux parties. Dans la première, je propose une synthèse des définitions, méthodes, et travaux existants. Dans la seconde partie, je présente les travaux de recherche que j'ai menés sur cette question.

La nécessité d'une synthèse de la terminologie associée à la question de la réponse réaliste m'est apparue évidente au regard de la diversité de la littérature associée. Celle-ci se traduit par une diversité des termes associés la réponse réaliste qui en sont parfois des synonymes, ou des termes désignant ses causes ou encore ses conséquences. Dans cette littérature, quels sont les usages des termes comme l'immersion, la fidélité, la présence, le réalisme, la validité écologique, le transfert ? Les acceptions de ces termes sont parfois multiples ou ont évolué au cours du temps. L'objet du chapitre 2 est de catégoriser ces termes et de poser les définitions que j'utiliserai. Ensuite, dans le chapitre 3, je m'attaque à extraire de la littérature scientifique les méthodes de conception et d'évaluation qui visent la réponse réaliste. J'y fais le choix, et le justifie, de la méthode comparative, consistant à mettre en regard les deux situations : l'activité réelle et l'activité virtuelle. Enfin, pour alimenter mes choix scientifiques, je propose au chapitre 4 une classification et une synthèse des travaux employant la méthode comparative. Ces trois chapitres constituent la première partie de ce document, qui établit le contexte scientifique dans lequel je positionne mes travaux sur la question de la réponse réaliste. Je présente mes travaux dans la seconde partie. J'y déploie la méthode comparative sur les quatre cas d'usage et présente les

résultats de ces recherches : sur la perception visuelle des matériaux (chapitre 5), la perception visuelle des formes (chapitre 6), la réalisation de gestes (chapitre 7), et la coopération entre l'homme et le robot (chapitre 8).

Première partie

Contexte et Définitions

Chapitre 2

Une Terminologie de la Réponse Réaliste

Dans ce chapitre, je passe en revue différents termes liés à la notion de réponse réaliste en réalité virtuelle, j'en propose une synthèse, pour les positionner en tant que synonyme, cause ou conséquence de cette notion.

2.1 Immersion

Les premières publications abordant la qualité de l'expérience dans les environnements virtuels ont mobilisé le terme *immersion*, en la définissant comme la *sensation d'être présent*[1] [97], ou encore la sensation d'être *absorbé ou impliqué*[2] [108]. Cette définition a ensuite été remplacée par un apparent consensus autour de l'idée que l'*immersion* désigne le degré de complétude et la qualité des interfaces d'un environnement virtuel. Biocca et Delaney [10] ainsi que Slater [114] proposent que le terme *immersion* désigne ce que le système procure du point de vue des interfaces sensorimotrices. Je l'utiliserai en ce sens dans ce document. Certains travaux cherchent à formaliser cette notion en distinguant d'une part les aspects techniques de l'immersion, et d'autre part la façon dont les activités sont réalisées dans les EV. Cette distinction se retrouve dans les approches de Slater (*Immersion* et *Behavioral Fidelity*) [114] et de Fuchs et al. (immersion sensori-motrice et cognitive) [47]. D'autres travaux ne font pas cette distinction, notamment les approches comme l'enaction ou la perception incarnée [127, 120, 34, 32, 33] et suggèrent que la question de la séparabilité entre perception et action est ouverte. L'existence ou non de cette distinction apparaît dans les courants historiques de la psychologie cognitive, avec des visions différentes, notamment le cognitivisme et le behaviorisme. Mes travaux ne cherchent cependant pas à explorer cette question. J'utiliserai par la suite le terme *immersion* selon la définition de Slater et de son usage par Mestre [86], c'est à dire ce qu'un système de réalité virtuelle propose comme interfaces du point de vue technique.

2.2 Fidélité

Un des premiers domaines s'intéressant à la réponse réaliste est celui des simulateurs de vol. Ce domaine est naturellement motivé par le besoin de simulateurs pertinents pour la formation les

1. *the sense of being there.*
2. *the state of being absorbed or deeply involved.*

pilotes d'avion. Le terme de *fidélité* des simulateurs apparaît dans la littérature, qui rappelle celui de *haute fidélité* utilisé dans le domaine de la reproduction sonore. Dans une étude sur la fidélité des simulateurs de vol et de son impact sur l'apprentissage Gerathewohl et al. [50] emploient la définition suivante du terme de fidélité : *le degré de précision auquel un dispositif reproduit un effet.* Ici le terme *effet* désigne la qualité du stimulus et non son effet sur l'humain. Les auteurs étudient en particulier l'effet de la présence ou non de plateforme mobile, mais également celle de simulateurs partiels (simulant une seulement une partie du fonctionnement du cockpit) comparativement aux simulateurs complets. Leurs conclusions indiquent que le niveau d'apprentissage semble proportionnel au degré de fidélité fourni. Ils mettent en avant cependant que la seule validité apparente (*face validity*), ressemblance apparente de la tâche et des contrôles au cockpit réel, n'est pas garante de comportements représentatifs, et mettent en avant la perception du danger et la motivation des pilotes comme des facteurs, plus difficiles à contrôler, pouvant influer sur les résultats de l'apprentissage. On voit ici se dessiner une mise en correspondance entre le degré de précision et de complétude d'un dispositif (le simulateur) et d'autre part une réponse des utilisateurs : le niveau d'apprentissage. Nous discuterons de l'usage de l'apprentissage comme indicateur de la réponse réaliste au chapitre 3.4.

D'autres travaux considèrent la fidélité non pas du point de vue de la qualité technique des interfaces sensori-motrices mais comme une caractéristique du comportement humain. Burkhardt [48] (pages 140, 141) a proposé une synthèse des concepts liés à la notion de fidélité en réalité virtuelle. Il en distingue deux types dans la littérature. La *fidélité perceptive*, caractériserait une expérience perceptive en RV qui serait crédible si elle était vécue dans le monde réel selon Carr [20] [3]. Stoffregen [55] associe la fidélité perceptive à un *jugement de ressemblance sans qu'il y ait doute ou illusion sur la nature artificielle du simulacre.* Deuxièmement, la *fidélité psychologique.* Toujours dans les définitions retenues par Burkhardt [48], elle correspond à la *mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle* selon Leplat [75], à une *activité et des processus psychologiques identiques à ceux de la tâche réelle* selon Patrick [96], et à une *fidélité de l'action* selon Stoffregen [55].[114]

On voit donc deux considérations : d'une part la *crédibilité* allouée par le sujet à l'ensemble des stimuli de la RV (fidélité perceptive), et une d'autre part l'activité dans la globalité et sa proximité à une référence réelle (fidélité psychologique). Stroffregen rejoint Riccio [106] sur cette distinction avec les termes de *Experiential Fidelity* et *Action fidelity.*

2.3 Présence

La notion de Présence a été beaucoup débattue dans la littérature et revêtu des significations différentes. Elle est étroitement liée à la réponse réaliste, soit en tant que *synonyme*, soit en tant que *cause.* Je présente dans les paragraphes suivants les évolutions principales de ses définitions et précise celle que j'emploierai dans la suite de ce document.

The Sense of Being There

Les premières définitions de la présence l'ont considéré sous l'angle d'une impression subjective globale ressentie par l'utilisateur d'un système de RV.

> *Presence is defined as the subjective experience of being in one place or environment, even when one is physically situated in another.*[144].

3. Formellement, Carr ([20], page 6) parle du terme de réalisme mais le rapproche de celui de l'expérience perceptive

Cette définition de la présence prend ses sources dans la culture populaire, des livres, des films, dans lesquels la notion de se sentir projeté dans un environnement, qu'il soit lu, imaginé ou observé au travers d'un support de communication, prend naturellement son sens. C'est un sentiment subjectif, dépendant de facteurs très divers, pouvant différer d'une personne à une autre, ou pour une seule et même personne suivant ses humeurs, sa fatigue, sa concentration, ou la période de la journée. On retrouve ce terme, dans le domaine de la téléopération, pour lequel la sensation (visuelle, tactile, sonore) de se projeter dans un robot distant est souhaitée, car elle est considérée comme facilitant la tâche [54].

Elle a été également appliquée à la réalité virtuelle, pour laquelle l'évaluation de la présence s'est faite classiquement par l'usage de questionnaires. Après avoir été exposés à un environnement virtuel, les usagers répondent à un questionnaire dont l'objectif est d'évaluer la sensation d'avoir été présent dans l'EV. Il s'agit de questions relatives au niveau de participation ressenti, au niveau de réalisme perçu, d'intuitivité du contrôle ou de la présence de distractions [144].

Cependant la pertinence et la validité des questionnaires a été remise en question [111], en particulier sur leur robustesse aux variations d'activité précédant l'administration du questionnaire [46], leur capacité à faire la différence [4] entre réel et virtuel [126], ou sur des expérimentations montrant que les questionnaires eux-mêmes construisent les sensations mesurées chez les sujets sans rapport réel avec leur activité dans l'environnement réel [115].

Réponse Réaliste

Plutôt que d'essayer de mesurer une sensation subjective dont l'évaluation semble sujette à réserves, une approche alternative est la caractérisation de la présence par l'évaluation de ses effets. L'idée centrale est de considérer que si la présence est forte dans un EV, alors l'activité réalisée par les sujets dans cet EV sera d'autant plus proche de la réalité. On se repose dans cette approche sur un *critère* de présence : la *réponse réaliste*. Cette qualification contourne la problématique de définir formellement la présence, elle en propose plutôt une définition opérationnelle. Dans la définition plus longue proposée par Vives Sanchez et al. [111], *the extent to which participants respond realistically to virtual events and situations*, on se réfère à la présence comme la mesure (*the extent*) pour laquelle le comportement est réaliste, mesure qui est une conséquence et qu'il faut évaluer.

La réponse réaliste peut concerner tous les aspects du comportement humain, la combinatoire entre les variables indépendantes (caractéristiques du système de réalité virtuelle) et les variables dépendantes (aspects du comportement humain étudiés) est infinie et les exemples dans la littérature se déploient sur un éventail très large. L'évaluation du comportement peut s'intéresser à la réponse physiologique : réponse électrodermale (RE), le rythme cardiaque (RC) en fonction de la qualité visuelle de l'EV [113], ou (RE) (RC) et température corporelle dans le contexte de la simulation du vertige [85]. A l'autre extrémité de l'échelle de mesure, nous pouvons considérer la réponse émotionnelle, comme par exemple dans le contexte du journalisme immersif, destiné à sensibiliser le public à des questions de société [31] ou la réponse à l'immersion dans des foules. Établir une échelle des caractéristiques des plus simples aux plus complexes est une question ouverte, il semble naturel de placer les comportements moteurs, biomécaniques, de manipulation d'objets entre les deux aspects (physiologiques, emotionnels) que nous venons de citer. Nous reviendrons au chapitre 4 sur la question de la classification des différents descripteurs

4. Usoh et al. [126] ont proposé une tâche identique en réel et virtuel consistant à chercher une boîte dans des bureaux, à deux populations distinctes Ils ont administré le même questionnaire de présence à ces deux populations. Les auteurs trouvent de très faibles différences dans les résultats et en ce sens questionnent la sensibilité des questionnaires de présence dans un contexte où ils s'attendent à un résultat clair en faveur de l'environnement réel, plutôt qu'une égalité entre les deux environnements.

de l'activité humaine que l'on peut considérer.

Adossées à son évaluation, des théories structurantes de la présence ont été avancées. En particulier par Slater et al. [116] qui soutient que la notion de présence ou *réponse réaliste*, dépend de deux composantes orthogonales : d'une part la sensation d'être là (tel que décrite à la section précédente), que l'auteur nomme *Place Illusion* ou PI, et d'autre part l'illusion de plausibilité (*Plausibility Illusion*) ou PSi, qui se produit lorsque l'utilisateur accepte de croire que le scenario virtuel dépeint dans l'EV est en train de se dérouler.

2.4 Validité Ecologique

En sciences humaines, l'écologie désigne l'étude des interactions entre une entité et son environnement. Cette entité peut être un organisme simple et son milieu de vie en biologie, ou, dans le cas de l'étude de la cognition humaine, de l'homme et de son environnement. Dans ce dernier cas, le terme *écologique* est utilisé pour caractériser le caractère représentatif de l'environnement d'étude du comportement humain (les méthodogies de recueil d'informations, le laboratoire), comparativement à son milieu de vie habituel. Ici, *Ecologie* est utilisé au sens étymologique du terme [5] et désigne l'environnement réel dans lequel se déroule l'activité humaine.

La validité écologique des tests en psychologie ou en psychométrie, est désignée comme la relation prédictive entre les résultats de tests psychologiques ou neuropsychologiques (questionnaires, mesures de l'intelligence, tests de mémoire, du langage, de la planification, de l'attention, de la prise de décision) et le comportement du patient dans une variété de configurations réelles. Cette relation prédictive n'est pas systématique, doit être étudiée, contrôlée, et fait l'objet d'études [17].

Les communautés de sciences cognitives et de médecine on vu une utilité forte de l'outil réalité virtuelle pour le diagnostic et la thérapie, pour des pathologies fonctionnelles et cognitives. *Les tâches [..] comme retrouver son chemin, se rappeler une liste de courses pour préparer un déjeuner dans une cuisine virtuelle, sont des exemples sur lesquels la validité ecologique peut être meilleure [en EV] comparativement à des méthodes traditionnelles d'évaluation* [121]. Ces méthodes traditionnelles sont typiquement les tests écrits avec un papier et du crayon, ou leur version informatisée. En effet, plusieurs expérimentations montrent que les évaluations en réalité virtuelle sont plus sensibles que les méthodes traditionnelles [93, 94, 95]. Les raisons invoquées pour expliquer une sensibilité meilleure pour les méthodologies employant la réalité virtuelle sont l'avantage de ne pas passer par une autoévaluation subjective de chaque individu [121], des comportements émotionnels plus marqués [37], la fidélité cognitive et la richesse des données comportementales acquises [122] ou la motivation accrue des patients pour ces méthodes [112].

Les travaux cités ici s'intéressent donc à l'amélioration de la validité écologique des tests et méthodes via les techniques de réalité virtuelle, sans nommément employer le terme de validité écologique de la réalité virtuelle. Dans ce document, je fais ce pas, et je nommerai *validité écologique* de la réalité virtuelle la capacité de la réalité virtuelle à provoquer des réponses proches de celles observées dans un environnement réel.

5. Ecologie : du grec ancien *οικος* "maison, habitat" et *λόγος*, "discours" c'est à dire la science des relations des organismes avec leur habitat, i.e. le monde environnant.

2.5 Transfert

Dans le domaine de l'apprentissage, le transfert est défini [100] comme la rétention de connaissances acquises dans un environnement, et leur réutilisation pour une nouvelle tâche [6].

La réalité virtuelle est un outil d'apprentissage potentiellement très intéressant et il est étudié en tant que tel dans divers domaines, comme l'apprentissage du geste médical [15], ou la maintenance d'appareils [49]. Le transfert des compétences apprises en réalité virtuelle vers la tâche ou l'activité réelle est la question centrale. Ce transfert peut ne *pas* avoir lieu quand les caractéristiques du système ne simulent pas assez finement certains aspects de l'activité [72]. Au contraire, de nombreux travaux observent un transfert effectif, par exemple pour des tâches de manipulation, avec même des compétences meilleures pour un apprentissage en réalité virtuelle comparativement à un apprentissage dans l'environnement réel [109].

Une des caractéristiques de la réalité virtuelle pouvant favoriser le transfert est la notion de réponse réaliste. Un environnement virtuel offrant une réponse réaliste semble être indiqué pour favoriser un transfert d'une tâche virtuelle à son équivalent réel. L'évaluation du transfert est d'ailleurs avancée comme une possible méthode d'évaluation d'un EV [11][36] . Je ne choisis cependant pas le terme de *transfert* comme synonyme ou condition de la réponse réaliste, et justifie ce choix dans la Section 3.4 de ce mémoire.

2.6 Synthèse

Dans les termes considérés précédemment se distinguent des synonymes, des causes et des conséquences de la réponse réaliste : Pour les **Synonymes** : la *présence* dans son acception de réponse réaliste et la *validité écologique*. Pour les **Conséquences** : le transfert d'apprentissage, la validité écologique telle que définie dans le domaine de la psychologie (validité des tests psychométriques). Pour être rigoureux, ce sont des conséquences *possibles* de la réponse réaliste, celle ci n'est pas acquise comme une condition nécessaire et suffisante du transfert ou de la validité des tests psychométriques. Pour les **Causes** : la *fidélité* en tant que degré de précision des dispositifs, l'*immersion* et ses formalisations (fidélité psychologique, comportementale, immersion sensori-motrice et cognitive), et les approches de formalisation de la présence (*Plausibility* et *Place* Illusion). Par souhait de simplicité [7], je choisis d'utiliser le terme de réponse réaliste comme désignant l'objet de mon étude. Je considère comme équivalents les termes de réponse réaliste et de validité écologique.

6. *Transfer of training is defined as the use of knowledge or skill acquired in one situation in the performance of a new, novel task*

7. Car la définition de la notion est contenue dans sa désignation.

Chapitre 3

Conception d'environnements virtuels pour la réponse réaliste

Je couvre d'abord dans la première section les méthodes et heuristiques pour la conception des EV dont l'objectif est de favoriser la réponse réaliste. Ensuite, je présente les méthodes identifiées pour la qualification de la réponse réaliste dans un EV et je justifie mon choix pour l'une d'entre elles : l'approche comparative.

Je choisis d'utiliser dans ce document une distinction qui se dessine naturellement en observant la littérature : il y a deux temps possibles pour la conception. Mobiliser des théories, recommandations, bases de connaissances *pendant* la conception, et évaluer un système *après* sa conception.

On retrouve cette dichotomie des méthodes de conception dans les travaux de Hix et al. [57] qui considèrent deux temps d'évaluation des EV, que l'on peut interpréter comme arrivant *pendant* ou *après* leur conception. Il s'agit pour les auteurs, d'une part, de l'*Evaluation Formative* qui a lieu lors les premières étapes de conception, impliquant les utilisateurs finaux, et dont les sorties sont qualitatives et quantitatives. D'autre part l'*Evaluation Sommative* qui a lieu sur une version finalisée de l'application, et dont l'objet est de la comparer empiriquement et quantitativement à d'autres applications visant la même finalité. Ces approches sont parfois combinées [58]. En effet, les résultats d'évaluations sommatives alimentent les bases de connaissances, et peuvent être réutilisées dans la phase formative.

Je présente dans ce chapitre les modèles formels, les recommandations d'usage, les bases de connaissances, que je classe dans la première catégorie (avant/pendant la conception = formative), et les méthodes d'évaluation dans la seconde (après = sommative).

3.1 Modèles Formels

Ils existe des modèles formels de la performance humaine qui peuvent être utilisés comme base de conception d'environnements de réalité virtuelle. A ma connaissance il n'y a pas de travaux qui ont effectivement tiré parti de ces modèles pour concevoir des environnements dont l'objectif est la réponse réaliste. Ceci est pourtant envisageable en théorie. Le modèle du processeur humain [19] avance un modèle simplifié, subdivisant les mécanismes du traitement de l'information par le cerveau en sous systèmes (mémoire court, long terme, perceptif, cognitif, moteur) ayant chacun leurs invariants (fréquence, résolution, latence), une telle information pourrait guider des choix techniques de latences, fréquences de signaux d'un EV afin de les garder dans les

limites perceptives et de traitement par l'humain et donc s'assurer de conditions d'immersion au plus proches du réel.

Dans le contexte de tâches de pointage par l'humain, la loi de Fitts [41] offre un modèle du temps de pointage dépendant de la taille et la distance de la cible. Typiquement, elle est un outil de dimensionnement d'icônes dans le domaine des interfaces 2D. Ce modèle et ses extensions [1] peuvent être utilisés pour l'évaluation d'un EV lors de la conception d'un EV, soit pour valider la réponse réaliste, soit pour modifier les caractéristiques de l'EV afin de s'en approcher.

Je place les modèles d'utilisabilité (pour une revue complète de la question voir la synthèse de Hornbaeck [59]), ou de performance comme le modèle GOMS [18] hors de cette revue des méthodes car ils apparaissent dans une littérature d'évaluation d'environnements non immersifs ne visant pas à simuler des activités réelles.

3.2 Recommandations d'usages et Heuristiques

Dans la littérature dont l'objectif est d'offrir des préconisations de conception pour la réponse réaliste, je distingue 4 démarches différentes :

1. augmenter le réalisme des modèles informatiques déployés pour la simulation
2. augmenter l'immersion [1]
3. favoriser le caractère naturel de l'activité
4. les approches énactives

1. *Réalisme* : on peut concevoir que la qualité des modèles physiques déployés pour figurer la réalité dans un environnement de synthèse participe naturellement de la réponse réaliste, que ce soient les algorithmes de rendu visuel des images de synthèse [113][148] ou les moteurs physiques pilotant les interfaces à retour d'effort [134]. Certains travaux vont à contre courant de cette intuition, en particulier l'idée de l'*Uncanny Valley* [87][88]. Cette théorie de la *vallée étrange* prévoit que l'acceptabilité d'humanoïdes augmente en fonction de leur anthropomorphisme, mais prévoit aussi aussi une vallée dans cette courbe globalement croissante [2].

2. *Immersion* : Une tendance générale [3] dans les résultats est que l'augmentation de tel ou tel aspect de l'immersion augmente un critère de qualité du vécu ou de la performance. Les publications abordent les domaines du retour visuel (présence ou non de stéréoscopie, de point de vue dynamique) [103, 6, 77, 30, 123, 135, 146], du retour haptique [138, 45], sonore [89, 149], ou olfactif [62]. Il reste que certains travaux ne vont pas dans ce sens et constatent des effets nuls de l'ajout d'informations sur un ou plusieurs canaux [81], voire négatifs, un des effets indésirables étant la cinétose [104][39]. Toutes ces approches sont représentatives de l'étude de la performance ou d'indicateurs de l'expérience utilisateur sans explicitement aborder la question de la réponse réaliste. Un travail de fédération de ces résultats a été avancé dans la base de données *VR Knowledgebase* [4]. Je traiterai à part dans la section 4 le cas des travaux qui abordent explicitement la question de la réponse réaliste, et ayant une approche de son évaluation.

1. Au sens défini en Section 2.1 page 15 c'est à dire ce qu'un système de réalité virtuelle propose comme interfaces du point de vue technique. Cette démarche revient à chercher à maximiser le nombre et la qualité des retours sensoriels et des captures motrices.

2. Cette vallée correspond à un niveau d'anthropomorphisme dérangeant : il est à un niveau insuffisant pour créer une réelle illusion d'un personnage humain, et trop élevé pour rester dans une zone ou le personnage est considéré comme un jouet ou un personnage de dessin animé.

3. Cette tendance peut-être sujette au biais de la publication des résultats positifs, i.e. que seuls les résultats montrant des effets ont été publiés

4. http ://knowledgebase.cs.vt.edu/

3. *Favoriser une Interaction Naturelle* : L'idée que, pour favoriser la réponse réaliste, la réalisation de tâches se fasse par des interactions issues d'une transposition aussi exacte que possible du réel (par exemple : préhension, marche), par opposition à des métaphores d'interaction, est un consensus clair, et se retrouve sous différents termes. On retrouve l'idée sous le terme de *Naturalism* chez Bowman [12], d'immersion cognitive par les *schèmes* d'interaction pour Fuchs et al. [47] qui adaptent ce terme issu de la théorie de la représentation de Vergnaud [128], ou de *Behavioral Fidelity* pour Slater [114] ou enfin d'*Action Fidelity* selon Stoffregen [55].

4. *Approches Enactives* : Une quatrième voie considère que lors de la conception d'un EV on doit considérer la nature des stimuli présentés et les modes d'interaction choisis comme interdépendants, et que l'utilisation des stimuli et l'action par un humain co-évolue dans le temps dans une construction mutuelle. Cette voie, l'*enaction* [127], s'oppose aux approches précédentes, que l'on peut nommer *cognitivistes*, et qui supposent une forme de déterminisme entre la nature d'une tâche et les stimuli nécessaires à sa réalisation. De Loor et Tisseau mettent en avant l'intérêt d'une approche enactionniste de la RV en ces termes : *Si un monde virtuel prometteur n'est pas nécessairement un monde qui reproduit le plus fidèlement possible la perception et l'action, que faut-il y mettre ? Selon une posture énactionniste, la priorité est la dynamique et l'évolutivité du couplage entre le système de réalité virtuelle et l'utilisateur* [35]. Selon ma lecture il n'y a pas de travaux qui ont explicitement employé une méthode enactive pour la conception d'EV, ceci est peut-être dû à la difficulté de formaliser le concept (je renvoie le lecteur à une discussion sur l'*opérationabilité de la théorie de l'enaction* dans les sciences cognitives par Penelaud [99]). J'illustre ces formes multiples de mobilisation du concept d'enaction par les quelques rares exemples issus de la réalité virtuelle : Stoffregen et Bardy [120] abordent la conception d'un EV en proposant de le concevoir comme une interface enactive. Selon leur approche, cela consiste à faciliter pour l'utilisateur la construction mentale des actions possibles. En ce sens, ils recherchent les meilleures présentations de l'information [5] concernant les actions possibles qui sont disponibles pour l'utilisateur. Sans formellement nommer l'enaction comme principe fondateur, les travaux proposant des EV adaptatifs, rentrent à mon sens dans cette catégorie. Les EV pour lesquels l'immersion et/ou l'interaction est adaptée dans le temps en fonction du comportement de l'utilisateur relèvent de la co-évolution de l'utilisateur et de son environnement, maître mot de l'enaction. Je cite en ce sens deux exemples de travaux que je classe dans l'approche adaptative. Le premier est celui des interfaces gestuelles adaptatives proposées par Jégo et al. [63], j'aborderai la question de la réponse réaliste pour cet usage spécifique du geste adapté au chapitre 7. Le second est l'approche de Slater qui propose aux usagers de faire eux-même les choix d'immersion dans un système simulant différents niveaux d'immersion (environnements virtuel simulé dans un environnement virtuel). Les auteurs avancent une *psychophysique de la présence* en permettant à l'usager de progresser dans les choix d'immersion tout en maximisant la sensation de présence. On peut l'apparenter à une co-évolution entre les impressions de l'usager et ses choix d'immersion [118].

3.3 Bases de connaissances

On peut considérer l'ensemble des expériences étudiant la relation entre l'immersion et la réponse des utilisateurs, en constante évolution, comme une base de connaissances *potentiellement* réutilisable pour concevoir des EV adaptés à un usage donné. Par exemple, la démarche de la base de données initiée par VR knowledge base [6] est faite en ce sens. Il reste que la per-

5. Les affordances

6. Cette démarche est illustrée par la base de données *VRKnowledgeBase* consultable et éditable sur internet http ://knowledgebase.cs.vt.edu/. C'est un système de dépôt et de consultation sur internet de résultats de recherche en réalité virtuelle.

tinence de transposer un résultat obtenu pour une immersion et une activité donnés vers un autre contexte, même similaire, est une question ouverte.

Une partie de cette littérature considère des activités non écologiques [7], c'est à dire impossibles dans la vie courante. Celles-ci ne peuvent pas être classifiées comme étudiant la réponse réaliste. On peut se faire une image d'activités non écologique avec deux exemples : les usages de la réalité virtuelle pour la visualisation de données scientifiques (observation de couches géologiques, visualisation et docking de molécules), et l'interaction avec des menus immersifs pour le contrôle d'application. Dans ces deux cas l'absence d'une équivalence réelle (nous se pouvons pas manipuler quelques molécules individuellement avec nos mains ou visualiser des couches profondes de la croûte terrestre) rend caduque le concept même de réponse réaliste, par l'absence de point de comparaison [8].

Une autre partie de la littérature considère des activités de nature écologique, comme se déplacer ou manipuler des objets. La démarche est d'évaluer l'impact de différents niveaux d'immersion sur des critères objectifs ou subjectifs qualifiant l'activité réalisée en VR. Dans une majeure partie de cette littérature, ces critères sont exclusivement acquis dans l'environnement virtuel (présence, performance, transfert, cinétose, appréciation subjective) sans référence réelle objective. En ce sens la réponse réaliste n'est pas l'objet de ces études, mais plutôt le confort et l'utilisabilité de l'environnement virtuel.

3.4 Méthodes d'évaluation de la Réponse Réaliste

Denis [36] propose une analyse de la littérature les méthodologies existantes pour évaluer la validité des EV. Elles sont citées dans le contexte de l'étude de la cognition spatiale, mais ces méthodes peuvent s'appliquer à toute activité humaine. Le terme de *validité* employé par l'auteur renvoie ici à la notre usage du terme *réponse réaliste*.

L'auteur distingue trois principales approches, je les analyse ici et justifie mon choix pour les travaux présentés dans ce mémoire.

L'approche Comparative. Celle-ci consiste à comparer les performances ou comportements, qualitativement et/ou quantitativement entre réel et virtuel. La comparaison s'effectue sur la perception, l'action ou les émotions de l'homme : forme perçues de objets, estimation des distances, construction d'une carte mentale de l'espace, manipulation d'objets. Les descripteurs -mesures objectives, questionnaires- sont adaptés à chaque activité.

L'étude des mécanismes neurobiologiques. Il s'agit de déterminer, par des techniques d'imagerie médicale, si les mêmes mécanismes cérébraux sont invoqués dans les deux situations. L'activation des mêmes régions du cerveau entre réel et virtuel suggérant la validité du moyen de simulation. L'étude des mécanismes neurobiologiques ou cognitifs sont au delà du niveau de notre analyse dans ces travaux. Il s'agit d'un outil d'exploration des mécanismes sous jacents qui peut conforter, dans directement la prouver, en termes de résultats globaux pour une tâche donnée, la validité de la simulation de réalité virtuelle. En particulier on peut imaginer les deux situations suivantes, d'une part l'activation des mêmes régions et des résultats différents entre Réel et Virtuel, d'autre part une différence dans l'activation des régions, et résultats (perception

7. Je mobilise la définition générale du terme écologique : "concernant les relations des êtres vivants avec leur environnement, ainsi qu'avec les autres êtres vivants" [73] et donc en ce sens des activités réelles, réalistes, issues de la vie courante de l'humain

8. On peut arguer que la manipulation de molécules ou la sélection d'items dans des menus peut être représentative d'activités réelles de manipulation d'objets. Je considère cependant que tout scénario ou activité en virtuel ne visant pas explicitement à reproduire les conditions d'une activité réelle ne rentre pas dans le champ d'étude des travaux présentés dans de document

spatiale) identiques entre Réel et Virtuel. En ce sens, cette méthode, même si elle peut confirmer ou infirmer l'équivalence de mécanismes sous-jacents à une tâche donnée, n'est pas garante de réponse réaliste. Si l'objectif est une étude de la réponse réaliste à toutes les échelles, mécanismes et conséquences, il semble nécessaire d'accompagner l'étude des mécanismes d'une évaluation quantitative spécifique des performances ou comportements dont ont vise l'égalité entre virtuel et réel. Formellement, il s'agit aussi d'une approche comparative, la différence étant l'échelle d'observation.

Le transfert d'apprentissage. La démarche est de considérer que si les compétences acquises dans un environnement virtuel sont réutilisées avec succès dans l'environnement réel, cela veut dire que la réponse dans cet EV est valide. Même si il semble logique qu'un EV provoquant une réponse réaliste soit un support potentiellement fiable pour l'apprentissage d'une tâche, l'inverse n'est pas forcément vrai. Une tâche bien intégrée et facilement réalisée en réel peut aussi reposer sur un EV non réaliste, dont certaines caractéristiques ont été modifiées pour accélérer l'apprentissage. A titre d'exemple, imaginons un sport qui nécessite la réalisation par le joueur de mouvements amples. Un environnement virtuel d'apprentissage pourrait [9] proposer la réduction des gains de déplacement [10] en virtuel afin de privilégier l'apprentissage de mouvements amples. Une réponse non réaliste étant une stratégie possible d'apprentissage pour accélérer le transfert, celui-ci n'apparaît pas comme une condition de la réponse réaliste dans l'EV.

Mes recherches portent sur le comportement global évalué de façon objective ou subjective sur une activité, et non sur les mécanismes cognitifs sous-jacents. C'est pourquoi, des trois méthodes citées, je choisis de m'intéresser à l'approche comparative sur des critères objectifs ou subectifs de l'activité comme méthode d'évaluation de la réponse réaliste.

3.5 Synthèse

Toutes ces approches peuvent avoir un impact sur la réponse réaliste. Cependant, les travaux se cantonnent à une évaluation de l'impact des variations de l'immersion sur différents critères (présence, performance, questionnaires subjectifs, mesures d'utilisabilité), sans déployer explicitement une démarche de vérification de la réponse réaliste. En particulier, peu de travaux [11] considèrent des tâches en virtuel en les comparant avec leur équivalent réel, j'en propose une revue au chapitre 4.

9. C'est une stratégie possible, sa validité est une question ouverte
10. Le gain de déplacement est le scalaire appliqué aux mouvements mesurés avant leur représentation visuelle sur un avatar de l'usager
11. De l'ordre de 40 à la date d'écriture de ce texte

Chapitre 4

Etat de l'art de la Comparaison entre Réel et Virtuel

Le chapitre précédent justifie le choix de l'approche comparative. Dans ce chapitre je propose une synthèse des principaux résultats d'expériences ayant utilisé cette approche.

4.1 Classification des activités

L'écriture, et la lecture, d'une synthèse des travaux employant l'approche comparative serait facilitée par une structure de présentation des résultats. Les variables indépendantes de cette masse de travaux sont l'*immersion* et l'*activité*. Les variables dépendantes sont les descripteurs de l'activité, mesurées en réel et en virtuel. Le point d'entrée de la présentation des résultats est donc soit l'immersion, soit l'activité. Je choisis l'activité comme point d'entrée car elle me semble moins sujette à changements dans le temps qu'une classification des aspects techniques.

Le classement par activités est une question ouverte : comment classer ? Par complexité ? Comment la définir ? Par niveau de ressources cognitives, perceptives, requises ? Pour choisir une taxonomie, je puise dans le domaine de l'analyse du travail, dans lequel de nombreuses méthodes on été proposées [143]. Je choisis celle de Fleishman décrite dans *The Description of Human Tasks* [42]. La classification propose une liste de 52 aptitudes (voir annexe 9.3 : 21 cognitives, 10 psychomotrices, 9 physiques et 12 perceptives, 21 interpersonnelles et sociales) destinées à décrire [1] un poste dans le monde du travail [44]. Je propose de la détourner de cet usage socio-professionnel pour en faire un outil de description de l'activité. Je présente donc par la suite les travaux comparant des activités réelles et virtuelles en les classifiant [2] selon l'aptitude principale requise pour chaque activité : perceptive, psychomotrice, cognitive, interpersonnelle. Y voir un continuum de la complexité des activités humaines est probablement hasardeux, le rôle de cette classification n'est que d'établir des groupes et non un ordre. Voici un exemple de lecture de ces quatre classes : perception seule (*je regarde un tissu*), percevoir et se mouvoir (*je fais tourner un robinet*), agir et réfléchir (*je résous un puzzle*), interagir avec autrui (*j'ai une discussion humoristique avec un ami*).

1. Son objet *est de décrire les postes [...] en termes d'aptitudes et ainsi relier les caractéristiques des tâches avec celles des individus. Il s'agit donc de définir les qualités et les compétences nécessaires pour occuper un poste ou une fonction dans le milieu de l'entreprise.* Je n'emploierai ici que le que le premier niveau de classification.

2. Cette catégorisation selon l'aptitude principale est sujette à discussion, une activité qui apparaît de nature purement perceptive peut inclure des actions humaines inconscientes comme suggéré par Varela et al. [127]. Elle est probablement mouvante, mais cependant utile ici car je m'en sers comme grille de lecture et non comme hypothèse scientifique.

4.2 Comparaisons entre réel et virtuel

L'appartenance des activités à chacune des catégories ci-dessous est sujette à discussion, je les y place selon une affinité générale et dans l'objectif de faciliter la lecture des résultats.

4.2.1 Niveau Perceptif

Couleurs, Eclairage : La capacité limitée des dispositifs d'affichage rend difficile la comparaison de matériaux virtuels et réels, en particulier si l'origine du signal est issue de mesures ou de modèles physiques. Je l'aborde dans mes travaux sur la représentation de matériaux complexes chapitre 5. A l'échelle de l'ambiance lumineuse, quelques travaux en RV ont été proposés, Mania et al. [82] mesurent présence et jugement subjectif de l'éclairage, en reproduisant en virtuel une pièce réelle avec des acquisitions photométriques, en virtuel l'imression subjective de la qualité d'illumination chutent, avec des impacts différents de l'immersion (mono, stéréo, hmd, station de travail).

Perception des Distances : La propriété visuelle la plus représentée dans les comparaisons entre réel et virtuel est celle des distances. Dans le cas de la distance égocentrique (observateur à objet), la tendance est à une sous-estimation dans les EV. Renner et al. dans une revue complète [3] de la littérature [105] constatent en moyenne une sous-estimation de 74% de la distance relativement à celle définie dans les modèles 3D présentés, Casques et CAVEs confondus [53]. Pour les distances exocentriques, c'est à dire d'objet à objet tous deux distants de l'observateur, dans un casque, cette sous estimation ne semble pas avoir lieu [51]. Ce résultat général est modulé par de nombreuses dépendances aux conditions expérimentales. En Présence d'une *Référence Réelle* identique à l'EV [61], la sous estimation s'efface. L'*âge* des participants joue un rôle, la sous estimation étant plus importante pour les sujets de moins de 10 ans [101]. Ensuite, la *mémoire* d'une présentation précédente de l'environnement, dans une condition identique ou différente (que ce soit en virtuel ou réel) améliore l'estimation [150]. D'autres études comparant réel et virtuel concourent à la constatation de la sous estimation, en étudiant le rôle du champ de vision (faible si la tête est libre de mouvements pour des distances lointaines) [24], ou questionnant les méthodes d'estimation de distances [110].

Haptique, Tactile : Une étude compare l'estimation de la taille de sphères entre réel et virtuel, avec des stimuli visuel et haptique (périphérique de type phantom) [145]. L'étude montre une surestimation visuelle, mais pas de différence en haptique. Les travaux sur le pseudo haptique étudient la faisabilité de comparer des propriétés mécaniques (raideur de ressorts en translation et torsion) d'objets réels et virtuels simulés à l'aide d'illusions visuo-tactiles [80][92], ils démontrent la faisabilité de ces comparaisons et en dessinent les limites.

Sonore : Une étude évalue les performances de localisation de sources virtuelles comparativement à des sources réelles [98]. Une étude évalue la capacité d'un système de réalité virtuelle à provoquer les interactions intermodales (visuelle/sonore) constatées dans les salles de spectacles [74].

4.2.2 Niveau Psychomoteur

La littérature aborde les tâches de *pointage* ou de placement d'objets, de *manipulation ou d'assemblage* d'objets, les comportements *posturaux*.

3. 2013

Pointage, placement d'objets

Les tâches de pointage [4] sont souvent étudiées dans contexte virtuel pour qualifier un système de RV car elles mettent en jeu un comportement fondateur : la coordination oeil-main. Les comparaisons entre réel et virtuel sont cependant rares. Dans ces tâches un dispositif de capture de mouvement permet d'enregistrer les mouvements et de comparer les caractéristiques spatiales et temporelles de la trajectoire de la main ou du bras. Le premier constat est la chute de performance (précision, temps) en virtuel : on peut l'attribuer à la latence d'affichage du système et à l'incohérence proprioceptive (affichage sur moniteur) [70], et constater que la phase finale du geste (corrections de précision) est plus difficile en virtuel [78]. L'existence de deux phases dans geste est constatée tant en réel qu'en virtuel, une de balistique et une de précision, mais des différences de configuration corporelle (bras/coude) subsistent [129]. Un dernier travail se penche sur le geste de golf dans un jeu et s'intéresse aux réponses en électroencéphalographie et constatent des différences importantes imputées à la faible quantité d'information disponible en virtuel [7]. Dans le contexte d'une tâche de placement et de classification de divers objets dans une étagère [60], en virtuel, les fixations des yeux sont beaucoup plus centrées sur l'objet en cours de manipulation et moins sur les coups d'œil en avance pour chercher un espace libre pour placer l'objet. Il semble qu'en virtuel la tendance est moins à la planification en avance mais à la gestion, un objet à la fois, de son déplacement. Tous ces travaux ont été réalisés en manipulation virtuelle non-colocalisée [5]. C'est une différence forte du point de vue proprioceptif qui peut être à l'origine des performances faibles constatées. Voir en Annexe le Tableau 9.1 pour un résumé de ces articles.

Manipulation d'objets et Assemblage

Considérons maintenant les tâches nécessitant de reconfigurer plusieurs fois la position d'un objet maintenu à cause de contraintes spatiales. C'est donc une tâche plus complexe que le simple transport d'un objet d'un point A à un point B considéré précédemment. Les résultats des travaux mobilisés ici [3, 125, 124, 147, 5, 21, 60, 79] sont résumés dans le tableau 9.2 page 99. Sur l'aspect *quantitatif*, quelle que soit la tâche, les performances (temps, précision, collisions) sont meilleures dans le cas réel. La latence du système en est identifiée comme une des causes [3][125][124]. L'ajout d'informations haptiques rapproche les performances du virtuel vers celles du réel dans le cas d'une tâche d'insertion de cheville dans un trou [125] (retour actif 6dof) ou lors d'une tâche de construction [79] (retour d'effort passif). Dans ce dernier cas, l'absence de moteur physique (en particulier l'absence de gravité) favorise des comportements non réalistes (laisser les objets flotter autour de soi pour aider lors de la tâche). Considérons maintenant les aspects *qualitatifs* de la comparaison réel-virtuel. Une des études constate une cohérence, entre réel et virtuel, de l'*ordre* des performances entre *stratégies de manipulation*. L'étude demande aux sujets de réaliser la tâche d'insérer une cheville dans un trou selon différentes stratégies : sans utiliser les objets comme guides ou en s'aidant des mouvements de glissement sur la surface de la table ou de la cheville. Un résultat allant dans le sens d'une réponse réaliste en virtuel est que l'*ordonnancement* des performances des stratégies est identique entre réel et virtuel [147]. Enfin, Chapoulie et al. [21] proposent d'anticiper l'influence négative des limites techniques du sytèmes (approximations du moteur physique). En ce sens les auteurs proposent d'égaliser les performances entre réel et virtuel en amont de l'usage effectif de l'EV, en modifiant la géométrie

4. La tâche de *pointage* consiste à utiliser un stylo ou tout accessoire maintenu dont une partie saillante est utilisée pour toucher des objets cibles disposés dans l'environnement d'un opérateur. Le *placement d'objets* désigne la préhension manuelle d'objets et leur placement à une position cible dans l'espace de manipulation.

5. La colocalisation est la superposition de l'espace de manipulation et de visualisation virtuelle. Dans le cas non colocalisé, l'espace de visualisation peut avoir subi une translation, une rotation ou une homothétie par rapport à l'espace de visualisation.

des objets virtuels manipulés dans une étude préalable. Dans cette approche, on accepte que la tâche en virtuel ne soit plus géométriquement représentative du réel, mais que ses composantes qualitatives (une boîte contenant des balles à verser dans un réceptacle) de celle-ci restent cohérentes avec le réel. On modifie les propriétés géométriques des objets afin d'égaliser les performances virtuel-réel [6]. Le sens d'égaliser les performances reste une question ouverte : ce n'est plus la même tâche, mais il peut y avoir une utilité de limiter le temps de réalisation (par exemple borner la durée de cette tâche dans le cas où elle n'est qu'une composante d'une activité, composante pour laquelle la représentativité de manipulation fine n'est pas le coeur de l'étude générale).

Equilibre, posture

En termes d'immersion, les références suivantes marquent une différence importante avec celles des deux classes d'activités précédentes (pointage, manipulation) en ce que le virtuel est en co-localisation (Casques ou CAVEs). Ces travaux [69, 22, 40, 9] sont résumés dans le tableau 9.3 page 100. D'une façon générale, même si les résultats quantitatifs peuvent différer en valeur absolue, l'*ordonnancement* des réponses comportementales suivant les conditions d'expérimentation sont toujours cohérentes entre réel et virtuel dans ces études. Dans le contexte du traitement de l'acrophobie, lors d'une tâche consistant à se tenir debout sur un plateau dont on augmente la hauteur (2 conditions : 0,80m et 3,20m au dessus du sol), une étude observe une cohérence réel - virtuel sur les mesures posturales [7], les auteurs notent aussi le sentiment d'appréhension du vide est cependant inférieure en virtuel [22]. La capacité d'un casque à provoquer des comportements de stabilisation en station debout ou sur la pointe des pieds, comparables au virtuel est étudiée par Kelly et al. [69]. L'étude montre que la vision stabilise [8] moins en virtuel qu'en réel. Si on égalise le champ de vision en réel à celui du casque, la différence est moindre. Dans une tâche de déplacement, avec une trajectoire devant éviter un obstable sur un chemin, 60% des participants s'écartent légèrement plus de l'obstacle en virtuel qu'en réel (16cm) [40], les auteurs suggèrent que ce résultat peut être amélioré par l'ajout d'un avatar visuel colocalisé avec le corps du sujet. Bideau et al. ont proposé une étude du comportement du gardien lors d'arrêts de lancers en handball, et trouvent que même pour un lanceur affiché de façon non réaliste (données de motion capture sur handballeur réel affichées sur un mannequin virtuel représenté par un maillage très simple), les mouvements du gardien son proches entre réel et virtuel. Il s'agit d'un résultat structurant sur la nature des informations prises en compte : c'est bien le mouvement du lanceur -avant le lancer effectif- et non la trajectoire de la balle qui est prise en compte, et il est cohérent entre réel et virtuel. On voit ici se dessiner deux tendances dans les résultats. D'une part, des mesures quantitatives qui peuvent être différentes entre réel et virtuel mais dont les variations suivant les conditions expérimentales sont cohérentes entre réel et virtuel. D'autre part, des résultats montrant que la nature des informations prises en compte par l'humain est cohérente entre les deux environnements. Le tableau 9.3 propose une vision synthétique de tous ces travaux.

6. Certains travaux font la démarche de modifier les caractéristiques de l'environnement virtuel, pour égaliser les performances, cette étude en est un exemple [21] pour la manipulation digitale d'objets où la taille des objets est agrandie empiriquement pour arriver à une manipulation virtuelle facilitée, contournant les limites techniques (précision, latence de capture de mouvement). C'est une démarche valide car elle aboutit bien à une représentativité du virtuel du point de vue des temps de manipulation, bien qu'elle invalide le caractère prédictif de la réalité virtuelle : on ne peut dans ce cas considérer que l'outil réalité virtuelle permet de dimensionner la géométrie des objets pour en assurer les conditions de manipulation en réel.

7. *electrodermal activity, anxiety, fear, center of pressure (COP) frequency, perceived stability, balance confidence and COP amplitude*

8. Le rapport des écarts types de position de la tête dans deux situations (yeux fermés, yeux ouverts) est le Quotient de Romberg, si il est supérieur à 1.0 cela indique un rôle stabilisateur de la vision.

4.2.3 Niveau Cognitif

Je place les travaux de comparaison réel-virtuel concernant la question de navigation et de représentation de l'espace, comme relevant principalement de compétences d'ordre cognitif.

Navigation, Représentation de l'Espace

Je synthétise ici les travaux présentés également en Annexe dans le Tableau 9.4 page 101.

Dans une tâche consistant à observer des objets disposés dans une pièce (casque dans le cas virtuel) pendant 20 minutes, puis pointer (sans retour visuel) vers les objets dont le nom est signalé par message audio, la performance (temps, précision de pointage) est supérieure en réel [107]. Les performances réel virtuel deviennent comparables quand le champ de vision réel est réduit aux valeurs du casque. Les auteurs mettent en avant le fait que les sujets profitent de la perception du mouvement propre (rotation sur une chaise) autant en réel qu'en virtuel. Lorsque cette information d'ordre proprioceptif n'est pas présente, comme par exemple dans le cas d'une direction d'observation contrôlée par un périphérique isotonique (contrôle en vitesse), les tâches nécessitant une compréhension spatiale de l'environnement sont mal représentées en virtuel [67]. Une autre approche propose de considérer une autre métrique de fidélité (au réel) que les performances quantitatives de pointage. L'étude [83] propose de questionner les sujets sur leur état mental lors du rappel de la position des objets : il s'agit de différents niveaux de confiance en sa réponse : je me **souviens**, je **sais**, c'est **familier**, je **devine**. Le résultat de l'étude suggère qu'une immersion non basée sur un schème (rotation du point de vue à la souris) semble procurer un état mental plus proche des mesures en réel. Alors que performances quantitatives sont meilleures avec une direction de regard contrôlée par la tête. Que poursuit-on alors ? Les performances ou l'état mental ? Question ouverte. Dans une approche mettant également de côté l'approche de comparaison réel-virtuel des performances brutes, une étude cherche à déterminer si la compréhension spatiale de l'environnement est *fonctionnellement* identique entre réel et virtuel [142]. Pour cela, les auteurs étudient le rôle de différentes perturbations du mode d'exploration sur la compréhension spatiale acquise soit en réel, soit en virtuel. Ces perturbations concernent le mode de déplacement (physique ou imaginé), le type de changement de point de vue (rotation ou translation), et l'amplitude de rotation. Les auteurs concluent à un comportement *fonctionnel* similaire pour un apprentissage en réel et virtuel. Enfin Mania et al. [83] s'intéressent au temps d'immobilité dans une tâche similaire aux précédentes : les auteurs ne trouvent pas de différence significative entre casque en monoscopique et réel. L'ajout de la stéréoscopie semble accroitre le temps d'immobilité lors de la recherche des éléments dans la scène.

4.2.4 Niveau Interpersonnel

Peu de travaux comparent une situation d'interaction sociale réelle et une virtuelle. Il est important ici de préciser les situations envisagées en virtuel, on peut considérer deux cas. D'une part l'interaction entre deux personnes via un média immersif et d'autre part l'interaction entre une personne et un agent virtuel supposé représenter l'interlocuteur réel présent dans le cas réel. Les deux premières références que je mobilise concernent le premier cas. Dans la dernière référence, dans le cas virtuel, l'avatar est une vidéo préenregistrée de l'interlocuteur réel. Cette dernière est difficile à classer car elle présente une forme de réalisme d'apparence (la vidéo d'une vraie personne), mais n'a pas le naturel de l'interactivité (il s'agit d'un enregistrement laissant des espaces de silence ménagés pour la réponse du sujet).

Les deux premières expérimentations utilisent un niveau d'immersion très différent entre participants (CAVE ou casque vs. station de travail), et constatent que le CAVE véhicule plus d'information émotionnelle et/ou sociale. Une étude démontre la possibilité de suggérer l'inconfort relationnel [117] en virtuel, par le regard insistant d'un sujet (complice) vers un autre, tant en virtuel qu'en réel. La tâche implique un groupe de 3 personnes (1 personne dans un casque, 2 personnes sur station de travail) devant reconstituer collaborativement des phrases à partir de mots écrits sur des feuilles de papier virtuelles disposées dans une pièce. Les mêmes personnes collaborent ensuite à une tâche identique en réel. Dans les deux situations, l'un des participants sur station, complice des expérimentateurs, doit regarder de façon insistante [9] un des autres participants. L'inconfort de ce dernier apparaît en réel et en virtuel. Le sujet avec casque prend une responsabilité supérieure. Pour le cas réel, ce déséquilibre n'apparaît pas. L'étude note un accord supérieur dans le groupe en présence d'une femme. L'article ne dit pas si cette observation est faite dans les deux cas réel et virtuel. Une expérience de puzzle collaboratif, avec une personne dans un CAVE une personne sur station de travail montre que la version CAVE est porteuse de plus d'information pour l'interaction sociale [4]. La comparaison entre le réel et le virtuel montre une implication et une collaboration inférieure en virtuel. Cependant l'objectif assumé de l'étude n'est pas de chercher à égaliser les performances entre réel et virtuel, mais d'explorer l'effet de dissymétrie de l'immersion (cave/station). Les deux références précédentes mélangent les niveaux d'immersion et ont été faites avec des moyens d'immersion limités [10]. La comparaison brute des résultats entre réel et virtuel n'a que peu de sens, ils suggèrent cependant que les émotions semblent pouvoir être suggérées même pour une immersion limitée.

Pour les deux références suivantes, la question de dissymétrie entre participants ne s'applique pas, il n'y a qu'un seul utilisateur immergé qui observe d'autres entités. Une autre étude démontre la possibilité de faire ressentir à l'usager le sentiment de compassion [52]. Il s'agit de se déplacer dans un environnement, dans lequel des personnes expriment, par leur comportement corporel, une demande d'aide. L'étude compare la situation réelle, avec des acteurs, et le virtuel, dans un casque, présentant des agents virtuels exprimant les mêmes besoins. L'étude caractérise la réponse émotionnelle par la direction du regard et le rapprochement des usagers à la personne en détresse. Les auteurs relèvent un caractère prédictif du virtuel sur le réel pour ces comportements et en ce sens les réactions émotionnelles de l'usager. On peut supposer qu'un environnement non immersif, voire un film, puisse provoquer des réponses émotionelles du même ordre, mais seul un environnement immersif (perception spatiale, échelle 1) permet d'étudier des comportements spatiaux comme la proxémie ou la direction du regard. Le sentiment d'anxiété a été étudié dans le scénario d'un entretien d'embauche [133]. Dans le cas réel, le décor d'ambiance est non professionnel, une table, deux chaises et un interlocuteur réel. Dans le cas Virtuel (casque) les auteurs font le choix d'ajouter des éléments de contexte professionels (salle de réunion, livres, ordinateurs). A la suite de l'entretien professionnel, l'anxiété perçue (questionnaire) est mesurée comme supérieure en virtuel (questionnaire subjectif), alors que la réponse electrodermale est plus faible en virtuel.

Ces résultats sont résumés dans le Tableau 9.5. D'autres travaux parlent de la question de l'interpersonnel, je ne les considère pas ici car ils opèrent dans des environnements de type station de travail donc non immersif : [**?**][2][136][137].

4.3 Synthèse

La première observation sur ces travaux est que la réponse réaliste n'est pas du tout la règle en réalité virtuelle, mais qu'elle peut l'être sur certains aspects du comportement, ou suivant le ni-

9. on suppose à la lecture de l'article qu'il dirige le regard de l'avatar à la souris
10. les deux études datent respectivement de 2001 et 2000

veau d'analyse que l'on adopte. La seconde est que ces travaux, présentent des niveaux d'analyse très différents. Je propose de distinguer 4 niveaux d'analyse dans l'approche comparative. Le premier est celui de la *comparaison absolue* entre réel et virtuel sur des critères quantifiables. Je pointe ici la démarche de comparer directement des mesures objectives ou subjectives, entre virtuel et réel. Le second consiste à s'intéresser au relations d'*ordre* de ces critères entre différentes conditions, et à étudier la cohérence de cet ordre entre virtuel et réel. Dans cette démarche, la valeur absolue des critères mesurés devient secondaire, c'est la capacité de la réalité virtuelle à retrouver la variation des performances suivant les conditions expériementales qui est le centre d'intérêt. Le troisième, consiste à analyser la *nature des informations* prises en compte par l'usager dans l'environnement qu'il soit virtuel ou réel. Cette troisième démarche s'intéresse non plus aux critères mesurés mais aux mécanismes cognitifs sous-jacents, ou en première approche de leur analyse, obtenir la connaissance des informations qui sont traitées au sein de ces mécanismes. Un exemple en est le cas de la simulation du gardien de handball qui prend bien en compte le mouvement du lanceur -avant le lancer effectif- dans ces choix de déplacement tant en réel qu'en virtuel. Si l'on constate une égalité des informations utilisées entre virtuel et réel pour réaliser une tâche, c'est une première étape vers la conclusion de mécanismes cognitifs semblables entre les deux environnements. Le traitement de ces informations peut cependant être différent, ce qui reste une question ouverte. Le quatrième niveau d'analyse est celui de l'observation de l'*état mental* de l'utilisateur. Les deux exemples qui relèvent de cette approche dans la littérature exposée précedemment sont, dans l'interpersonnel, l'accord avec autrui, et dans la représentation spatiale, le niveau de confiance relativement à une réponse. L'analyse des *mécanismes* sous jacents et la recherche de leur égalité entre réel et virtuel est une question importante, et relève de l'interaction entre les communautés de sciences cognitives et de réalité virtuelle. Elle sort du cadre de ce document.

Tous ces niveaux auxquels la réponse réaliste est considérée sont pertinents et participent de la base de connaissances utile aux communautés étudiant ou utilisant la réalité virtuelle. Le choix de quel niveau d'analyse adopter pour qualifier la réponse réaliste dans un système de réalité virtuelle dépend du domaine de recherche ou du cas d'application. Un industriel requérant des réponses sur la perception de matériaux, ou de tâches de montage sera plutôt amené à privilégier la comparaison absolue, ou l'ordonnancement. Les chercheurs en sciences cognitives iront aussi chercher les mécanismes sous-jacents.

Deuxième partie

Travaux de Recherche

Une partie de mes travaux de recherche s'est intéressée à connaître les limites de la réponse réaliste en réalité virtuelle, et comparant l'activité réelle et l'activité en virtuel. Je présente dans cette partie mes travaux concernant quatre activités. Je les présente en regard de la classification proposée comme guide de lecture au chapitre 4.1. Celle-ci considère les aptitudes invoquées pour réaliser une tâche : perceptive, psychomotrice, cognitive, interpersonnelle. Bien sûr, chaque activité relève d'une combinaison d'aptitudes. Cependant, pour en faciliter la lecture, je choisis de les présenter suivant l'aptitude qui semble la plus importante ou la plus sollicitée dans l'activité considérée. Pour un niveau principalement *perceptif*, je présente un travail sur l'observation des matériaux au chapitre 5. La perception des formes et tailles d'objets que j'aborde au chapitre 6 relève d'aptitudes *perceptives* et éventuellement *psychomotrices*. Au chapitre 7 j'étudie le geste de manipulation d'objets auquel j'associe les niveaux *psychomoteur* et *cognitif*. Enfin, j'aborde l'aptitude *interpersonnelle* par l'étude de deux activités de collaboration homme-robot au chapitre 8.

Chapitre 5

Apparence visuelle des matériaux

5.1 Contexte : Rendu Predictif et Réalité Virtuelle

Dans le domaine du cinéma ou des jeux vidéo, une apparence visuelle plausible ou simplement esthétiquement plaisante de la scène et des objets qui la composent peut être acceptable. Ce n'est pas le cas pour l'usage de la synthèse d'image pour la conception de matériaux, pour lequel il est nécessaire de déployer des modèles physiques de l'interaction lumière-matière. C'est un passage obligé pour aller vers le caractère prédictif des images de synthèse produites. En effet, la conception industrielle de matériaux passe par la réalisation de séries d'échantillons physiques, de compositions différentes, pour ensuite sélectionner l'apparence visuelle cherchée et fixer la composition du matériau. Le processus est coûteux et ne converge pas toujours. Dans ce contexte, l'outil idéal de conception de matériaux serait celui d'un atelier virtuel de conception permettant de mélanger -virtuellement- des composés et d'observer l'apparence visuelle résultante sur un support numérique. Il peut s'agir par exemple d'une peinture de voiture, d'un produit cosmétique, d'un matériau de construction. On peut considérer ce problème comme un domaine le l'informatique graphique, le *rendu prédictif* [141], il est cependant éminemment pluridisciplinaire : physique des matériaux, optique, synthèse d'image, parallélisation de calcul, calibration d'affichage, perception humaine. La mise en place d'un tel outil pose donc de nombreuses questions. Quels modèles physiques mettre en place suivant le type de matériaux simulés ? Comment maîtriser la chaîne d'affichage ? Quelle est la validité, objective et subjective, des images produites dans un moteur de rendu ?

La texture d'un objet est mieux perçue si l'on peut se déplacer pour l'observer sous différents angles [140, 38]. La capacité à changer de point de vue est également importante dans le cas de matériaux dits *à effets*, qui présentent des qualités visuelles changeant en fonction de l'angle d'observation, ou les matériaux interférentiels. En ce sens, l'ajout de fonctionnalités de réalité virtuelle dans un moteur de rendu physiquement réaliste est aussi un champ de recherche scientifique : quel est l'impact de la stéréoscopie, du changement de point de vue dynamique, voire de la scénographie (observer un petit échantillon de peinture automobile seul, ou le même matériau sur une voiture entière à l'échelle 1), sur l'observation de matériaux complexes en réalité virtuelle ? Dans un projet de recherche collaboratif et pluridisciplinaire [1], j'ai abordé certaines de ces questions. Dans la section suivante, je présente sommairement ce projet, puis les deux types de matériaux abordés et les modèles associés. J'expose ensuite comment j'ai abordé la question de la perception et la réponse réaliste pour l'un des matériaux simulés.

Ces travaux décrits ici ont été réalisés dans le cadre des thèses de F. da Graça [29] et V. Medina [84], et sont décrits dans [28][27] et [130][131].

1. Projet ANR LIMA (Lumière Interaction Matériaux Aspect) 2012-2016

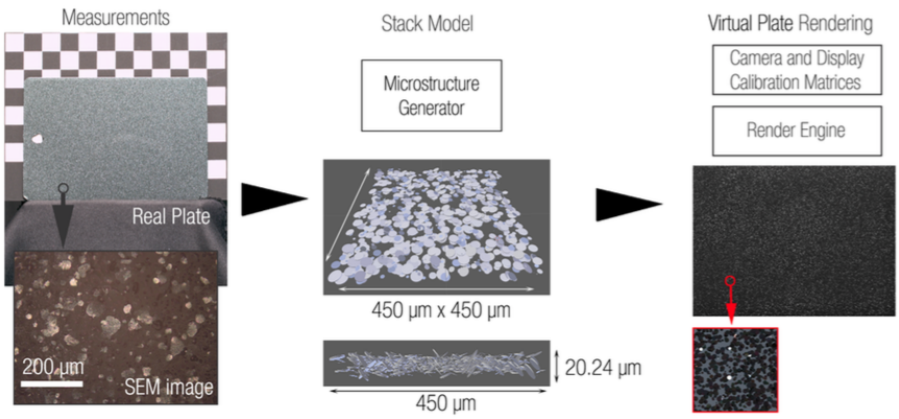


FIGURE 5.1 – In order to simulate car paints that have have metallic flakes embedded in the base coat and produce sparkling effects, statistical models describing such materials have been set up [23], based on optical measurements. The models create virtual microstructures, that are fed into a rendering engine for stereoscopic visualization.

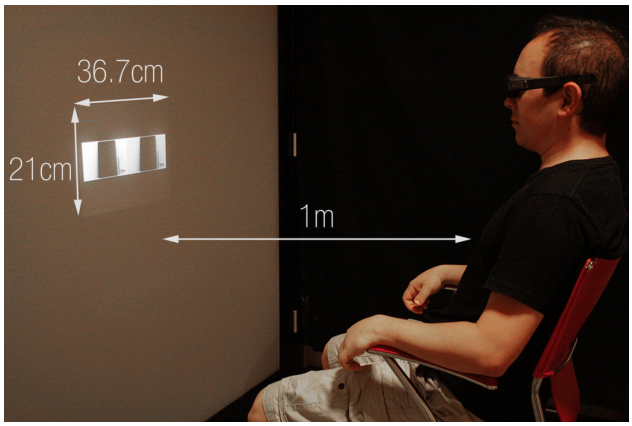


FIGURE 5.2 – Car paint models are fed into a rendering engine for stereoscopic visualization. Then, in a perceptive study, users were asked to compare pictures of real car paints and simulated ones

5.2 Projet Lumière Interaction Matériaux Aspect

Ce projet de recherche collaboratif a permis la mise en place d'une première approche d'un atelier de matériaux virtuels, en s'organisant en 4 étapes : 1) les mesures optiques sur les matériaux de travail pour en caractériser la composition, 2) la mise en place de modèles d'interaction lumière-matière mettant en oeuvre des matériaux modélisés 3) le rendu en images de synthèse et 4) des validations perceptives permettant de comparer des échantillons réels et virtuels. Celui-ci a nécessité des techniques de modélisation et de mesures des échelles nanoscopiques jusqu'aux objets macroscopiques : synthèse et préparation de nano-matériaux, estimation statistique de la morphologie des pigments et de leur distribution spatiale, la mesure à petite et grande échelles des fonctions diélectriques et des indices optiques. Suivant l'échelle des constituants, un outil d'homogénéisation numérique des propriétés optiques ou une modélisation géométrique des constituants sont mis en place. Ils sont ensuite mobilisés dans un moteur de rendu 3D, ce qui fait le lien entre l'échelle des constituants et l'échelle de l'observation humaine.

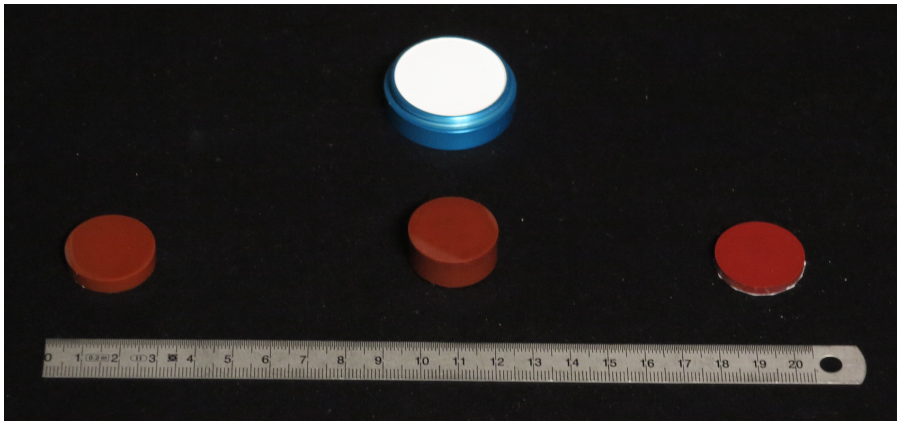


FIGURE 5.3 – Illustration du cas ou le matériau est un mélange de pigments dans un polymère (le liant), et les pigments sont de très petite taille devant les longueurs d'onde du visible. L'image représente trois échantillons à différentes concentrations d'hématite Fe_2O_3, avec un blanc de référence. L'apparence du matériau est homogène.

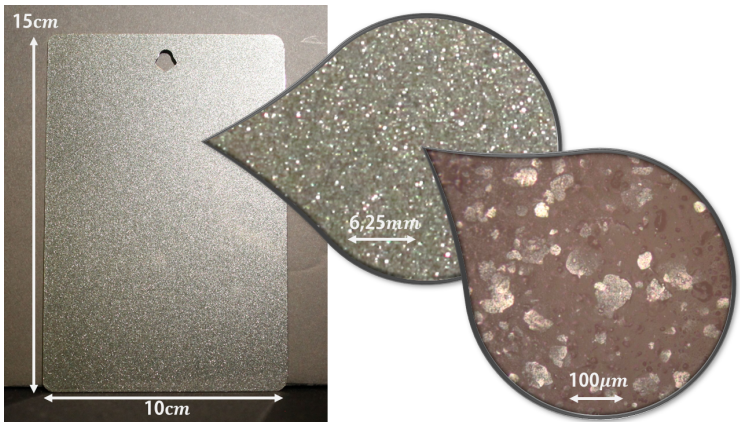


FIGURE 5.4 – Illustration du cas ou la charge est composée de paillettes d'aluminium d'une taille d'environ $100\mu m$. L'échantillon présenté ici est une peinture automobile, utilisée comme matériau de travail dans les expérimentations décrites dans ce chapitre

5.3 Modèles de matériaux

On considère des matériaux manufacturés, constitués principalement d'un liant plastique transparent dans lequel on mélange des particules, on parle de *charge*, conférant les propriétés visuelles principales. La *charge* peut être composée de pigments de très petite taille ou des particules de plus grande taille visibles à l'oeil nu. Dans le premier cas, l'apparence du matériau est homogène, dans le second, des effets visuels dépendant de la distance ou l'angle d'observation peuvent apparaître suivant la nature des particules.

Ces deux cas ont été étudies dans le projet et sont illustrés dans les figures 5.3 et 5.4.

Les modèles physiques mobilisés pour simuler l'interaction lumière diffèrent selon que la taille p des particules composant la charge sont a) petites ou b) grandes comparativement aux longueurs d'ondes de la lumière visible. Le Tableau 5.1 les synthétise. Le premier cas, $p \ll \lambda$, fait appel à une représentation ondulatoire de la lumière et une résolution approchée des équations de Maxwell dans le matériau représenté, selon une méthode d'homogénéisation [65]. Cette étape a été réalisée dans le projet par un des partenaires [2]. Dans ce cas le comportement optique du matériau est caractérisé dans sa globalité par des indices complexes (n,k). Le second cas, $p \gg \lambda$, fait appel à l'optique géométrique, et le comportement de la lumière est simulé dans un

2. Centre de Morphologie Mathématique, Mines ParisTech

moteur de lancer de rayons, et les particules représentées par des objets 3D [3]. Les travaux se sont concentrés sur deux types de matériaux correspondant à ces deux cas : a) les matériaux à pigments, d'aspect homogène, et b) les matériaux comprenant des paillettes visibles à l'oeil nu. Ces derniers induisent notamment sur l'apparence un effet de scintillement qui peut apparaître ou disparaître selon l'angle de vue.

	Cas A : Particules petites devant λ	**Cas B** : Particules grandes devant λ
Taille p des particules	$p \ll \lambda$	$p \gg \lambda$
Modèles Optiques	Approximation Quasi-statique, Optique Ondulatoire, Equations de l'électrostatique (Gauss)	Optique Géométrique, Lancer de Rayons 3D
Propriétés Visuelles	Matériau d'apparence homogène	Matériau à effets (scintillements, pailettes visibles)

TABLE 5.1 – Différentes échelles de particules et modèles de la lumière associés. p représente la taille des particules composant la charge, λ la longueur d'onde de la lumière incidente

5.4 Etalonnage de la chaîne d'affichage

La première étape indispensable au rendu de matériaux sur des affichages numériques est celle de l'étalonnage de la chaîne d'affichage. Le moteur de rendu est dit *spectral*, c'est à dire que les modèles de la lumière que l'on utilise sont électromagnétiques et la décrivent comme une distribution d'énergie sur des fréquences d'ondes. Cette information doit être convertie dans une représentation numérique de la lumière, un espace de couleurs, en prenant en compte les fonctions de transfert des systèmes d'affichage, et des éventuels filtres optiques présents dans la chaîne allant jusqu'à l'œil de l'observateur, comme les lunettes stéréoscopiques. Ces questions d'étalonnage ouvrent des questions scientifiques : quels choix de représentation faire quand l'espace des couleurs que peuvent adresser les écrans (luminance et chrominance) est une sous partie du spectre simulé ? Dit autrement, que faire quand mon écran ne peut afficher toutes les couleurs ou qu'il ne peut afficher certaines des intensités lumineuses ? J'ai abordé ces questions dans les travaux cherchant à maîtriser le rôle de l'affichage dans la représentation et visant la comparabilité réel-virtuel du point de vue colorimétrique, dans le cas de *matériaux homogènes* [130][131].

5.5 Matériau étudié : une peinture automobile

Je choisis de concentrer dans ce manuscrit l'exposé non pas sur la questions de chrominance et de l'étalonnage colorimétrique, mais sur la question de la représentation des effets des variations spatiales importantes de la luminance. Une classe de matériaux qui se prête bien à cette problématique est celle des les peintures automobiles métallisées relevant du cas $p \gg \lambda$.

3. Le cas intermédiaire, $p \approx \lambda$, ne permet pas de faire les approximations quasitatique ou d'optique géométrique, et nécessite d'échafauder un modèle décrivant la diffusion élastique des ondes (la théorie de Mie par exemple), il n'est pas considéré dans le projet.

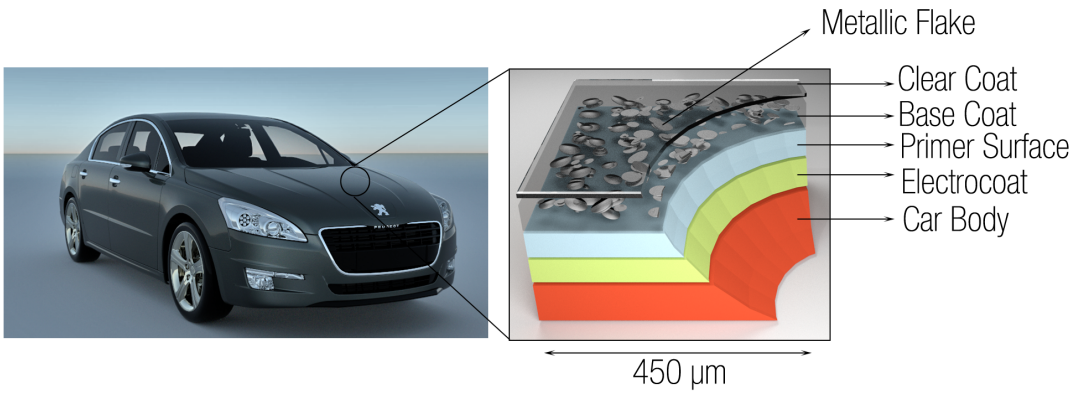


FIGURE 5.5 – Structure d'une peinture automobile utilisant des paillettes

En effet, l'industrie automobile emploie des paillettes métalliques dans certaines des peintures de carrosserie pour des raisons esthétiques. Différentes couches sont appliquées (voir Figure 5.5, ces couches assurent son adhésion au métal de la carosserie, ou sa protection des intempéries), une en particulier (Base Coat) participe de son apparence visuelle grâce aux effets de scintillement induits par ces paillettes.

5.6 Etude perceptive

5.6.1 Modèle de peinture à paillettes d'aluminium

Des micro-structures virtuelles sont nécessaires dans la simulation de la réponse optique des couches de peinture avec un moteur de rendu. Nous sommes dans l'approximation de l'optique géométrique, mobilisant un moteur de lancer de rayons, la peinture sera donc modélisée par un modèle 3D. Pour rendre la distribution spatiale des paillettes la plus proche du matériau réel (Figure 5.4), la procédure suivante a été appliquée par le partenaire du projet en charge des modèles [23] :

1. Segmentation de paillettes d'aluminium sur une image en niveaux de gris issue de microscopie MEB [4]
2. Mesure de la dispersion, la taille et orientation des paillettes
3. Mise en place d'un modèle stochastique utilisé pour distribuer les particules à l'intérieur d'une micro-structure sur la base des observations statistiques de l'échantillon réel. Il comprend des heuristiques de dépôt et d'empilement, évitant en particulier le chevauchement en volume des paillettes. Il s'agit à cette étape d'une liste de positions, d'orientations et de diamètres des cylindres.

Ensuite, dans le moteur de rendu, une micro-structure 3D est générée à partir de la distribution précédente, dans laquelle les paillettes sont approximées comme étant des cylindres plats (Figure 5.6). Cette microstructure 3D est ensuite répétée, avec des variations d'orientation permettant de faire en sorte que le pavage ne soit pas apparent. Finalement, l'indice de réfraction complexe de l'aluminium (composant des paillettes) est associé à l'ensemble des paillettes virtuelles. Ce modèle 3D est ensuite mobilisé dans le moteur de rendu spectral développé spécifiquement dans le projet, qui prend en compte les informations géométriques et optiques contenues dans le modèle pour générer une image d'un échantillon. Le moteur de rendu permet de mettre en scène

4. Microscope Electronique à Balayage

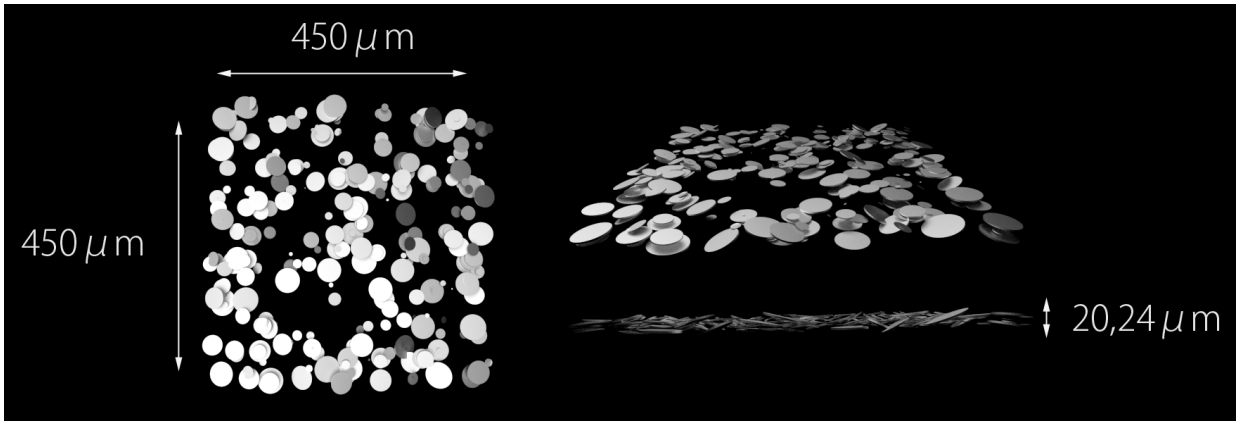


FIGURE 5.6 – Micro-structure 3D générée à partir d'un modèle de distribution stochastique issu de l'analyse d'images en microscopie de l'échantillon réel de peinture. Les paillettes sont approximées comme étant des cylindres.

FIGURE 5.7 – Echantillon virtuel de peinture automobile basé sur le modèle de distribution de paillettes développé dans le projet. La peinture est déposée sur une plaque plane identique aux plaques réelles utilisées pour la comparaison visuelle. La micro-structure présentée en Figure 5.6 est répétée de façon à paver la surface de l'échantillon.

l'échantillon dans un décor virtuel, en illumination globale, que l'on modélise au plus proche des conditions d'observation réelle (Figure 5.7).

Dans les paragraphes suivants j'appellerai *morphologie* les paramètres du modèle qui décrivent une plaque échantillon, qu'elle soit réelle ou virtuelle. Il s'agit dans ce cas d'une distribution de densité et des diamètres des paillettes. La morphologie réelle est obtenue à partir d'un traitement d'image sur l'imagerie microscopique recensant les propriétés spatiales. La morphologie virtuelle est générée par le moteur de rendu, soit à partir de ces mesures dans une démarche de reproduction du réel, soit librement par les actions de l'utilisateur de l'atelier de conception dans son usage créatif. L'établissement de cette morphologie réelle et virtuelle permet de chercher à évaluer le système mis en place : il s'agit de vérifier si pour une apparence visuelle égale entre réel et virtuel, la morphologie est identique. Je décris cette démarche dans la section suivante.

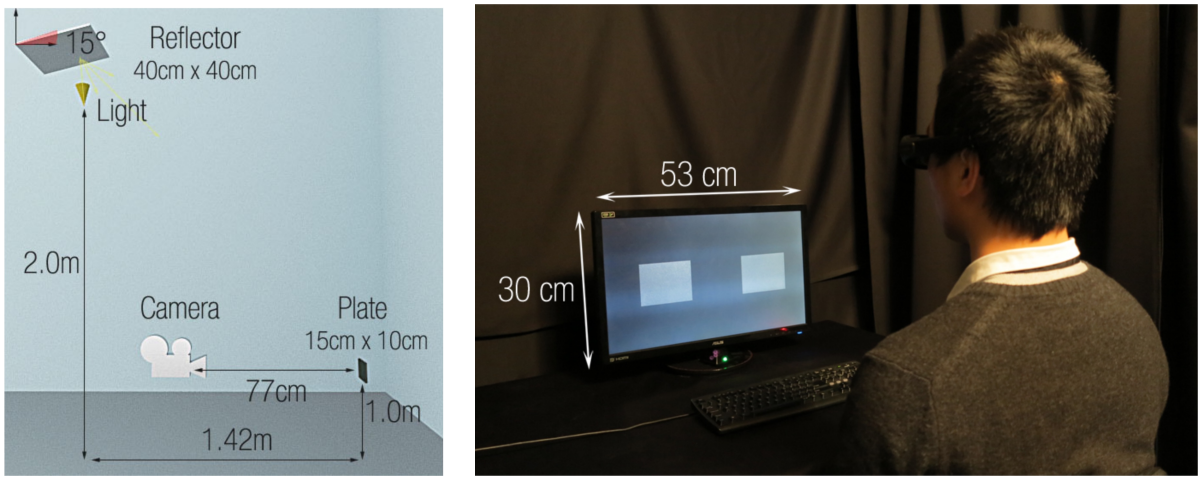
5.6.2 Tâche de comparaison réel-virtuel

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la capacité d'un atelier virtuel a prévoir l'apparence visuelle d'une peinture industrielle. Dans l'atelier virtuel, l'utilisateur règlera les paramètres de la morphologie du modèle pour arriver à une apparence qui lui sied. On passera ensuite à la fabrication d'un échantillon prototype. Les paramètres du modèle renseigneront les procédures

de fabrication du matériau, et l'on s'attend à ce que cet échantillon ressemble au rendu virtuel.

Ceci revient à se poser la question suivante : pour une apparence souhaitée, décidée par l'utilisateur sur la base d'un échantillon virtuel qu'il a créé dans l'atelier, le modèle physique renvoie-t-il une morphologie qui donne lieu à une échantillon physique identique, ou proche de l'apparence souhaitée ? Pour explorer cette question, la méthode comparative réel-virtuel s'applique bien : mettre un panel d'observateurs face à un échantillon réel dont on connaît la morphologie, et lui faire comparer des échantillons virtuels dont la morphologie varie. On demande aux sujets d'évaluer les échantillons virtuels qui ressemblent le plus à l'échantillon réel. Si les égalisations d'apparence s'accompagnent d'une égalisation des métriques entre réel et virtuel, l'atelier remplit son usage. Est-ce le cas pour ce matériau ? Les paragraphes suivants décrivent cette expérience et en discutent les résultats.

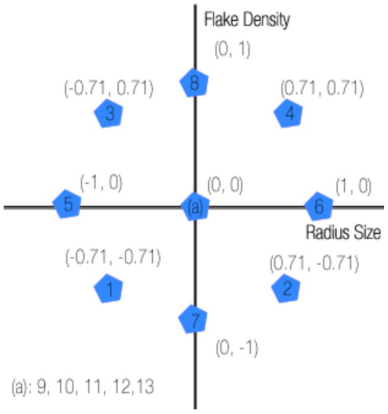
L'expérience se concentre sur deux paramètres (les variables indépendantes du plan d'expérience) du modèle physique : la *densité* et la *taille* des paillettes : ceux-ci affectent de manière significative l'aspect visuel de l'échantillon de peinture.



(a) (b)

FIGURE 5.8 – (a) Disposition de la scène virtuelle (b) conditions d'observation des échantillons. On présente côte à côte une photographie stéréoscopique de l'échantillon réel et une image de synthèse. Deux conditions d'observation sont étudiées : en monoscopique et stéréoscopique. Pour éviter les différences colorimétriques et d'intensité lumineuse entre les deux conditions, les lunettes stéréoscopiques sont portées dans les deux cas (mono et stéréo). Dans le cas monoscopique une image cyclopéenne (c'est à dire issue d'un rendu d'une caméra située entre les deux yeux de l'observateur) identique est présentée a à chacun des deux yeux

Pendant l'expérience, les sujets (26 personnes en tout) étaient assis dans une salle aux tentures noires afin de minimiser le rôle de l'eclairage ambiant, face à un écran stéréoscopique. Les sujets ont observé une série de plaques selon deux modalités : monoscopique et stéréoscopique. Les plaques présentées ont une densité et un rayon de paillettes différents (Figure 5.10, et sont distribuées autour de la valeur centrale (égalité avec le physique) selon un plan centré composite (Voir Figure 5.12). Les sujets ont évalué la similarité de la plaque virtuelle et de la photographie de la plaque réelle en utilisant une échelle de 11 points, allant de 0 (la plaque virtuelle est identique à la plaque de référence) à 10 (la plaque virtuelle est différente de la plaque de référence).



.

FIGURE 5.9 – Le *plan centré composite* utilisé dans l'expérience distribue les stimuli autour d'une valeur centrale en contribuant à diminuer le nombre de stimulide plaques différentes à utiliser et la variation de la densité et la taille des paillettes métalliques à inclure dans l'expérience visuelle. 13 valeurs ont été choisies, les nombres entre parenthèses représentent les propositions normalisées des valeurs physiques (rayon, densité), la valeur 1 correspondant à 50% de la valeur centrale

5.7 Résultat : une correspondance des métriques

Les valeurs de l'échantillon virtuel considéré comme le plus proche sont extrapolées à partir du plan centré composite. Le résultat principal de l'expérience montre que les paramètres de la morphologie de l'échantillon virtuel considéré comme visuellement le plus proche du réel, sont proches des valeurs physiques. Le second résultat est que l'usage de la stéréoscopie améliore la concordance métrique virtuelle / réelle, voir Table 5.3. Pour le cas stéréoscopique, les valeurs égalisées perceptivement en virtuel sont 6,45 et $31,3\mu$m pour des valeurs réelles de 6 et 30μm respectivement de densité et de rayon des paillettes mesurés sur l'échantillon réel. Ceci correspond à une surestimation du rayon de 4,3% et de la densité de 7,5%. Les résultats montrent également que l'évaluation de la note de similitude est plus sensible au rayon qu'a la densité de paillettes.

Facteur	**Valeur mesurée**	Limite inférieure	Limite supérieure
Densité des paillettes	6.0	3.5	9.5
Taille des paillettes (le rayon)	30μm	15μm	45μm

TABLE 5.2 – Tableau présentant 1) Les mesures physiques sur la peinture automobile réelle, qui donnent un rayon de la paillette moyen de 30μm, et une densité des paillettes de 6.0 (rapport de volume avec/sans paillettes dans l'échantillon, sans unité). 2) les valeurs minimum et maximum pour la densité des paillettes, et le rayon des paillettes, qui ont été trouvés empiriquement lors de pré-tests.

	Monoscopique	Stéréoscopique
Rayon de la paillette	$30,9\mu$m	$31,3\mu$m
Densité des paillettes	$6,75$	$6,45$
R^2	0.961	0.976

TABLE 5.3 – Valeurs optimales calculées à partir de la surface de réponse ainsi que le coefficient de détermination de la régression sur les données R^2

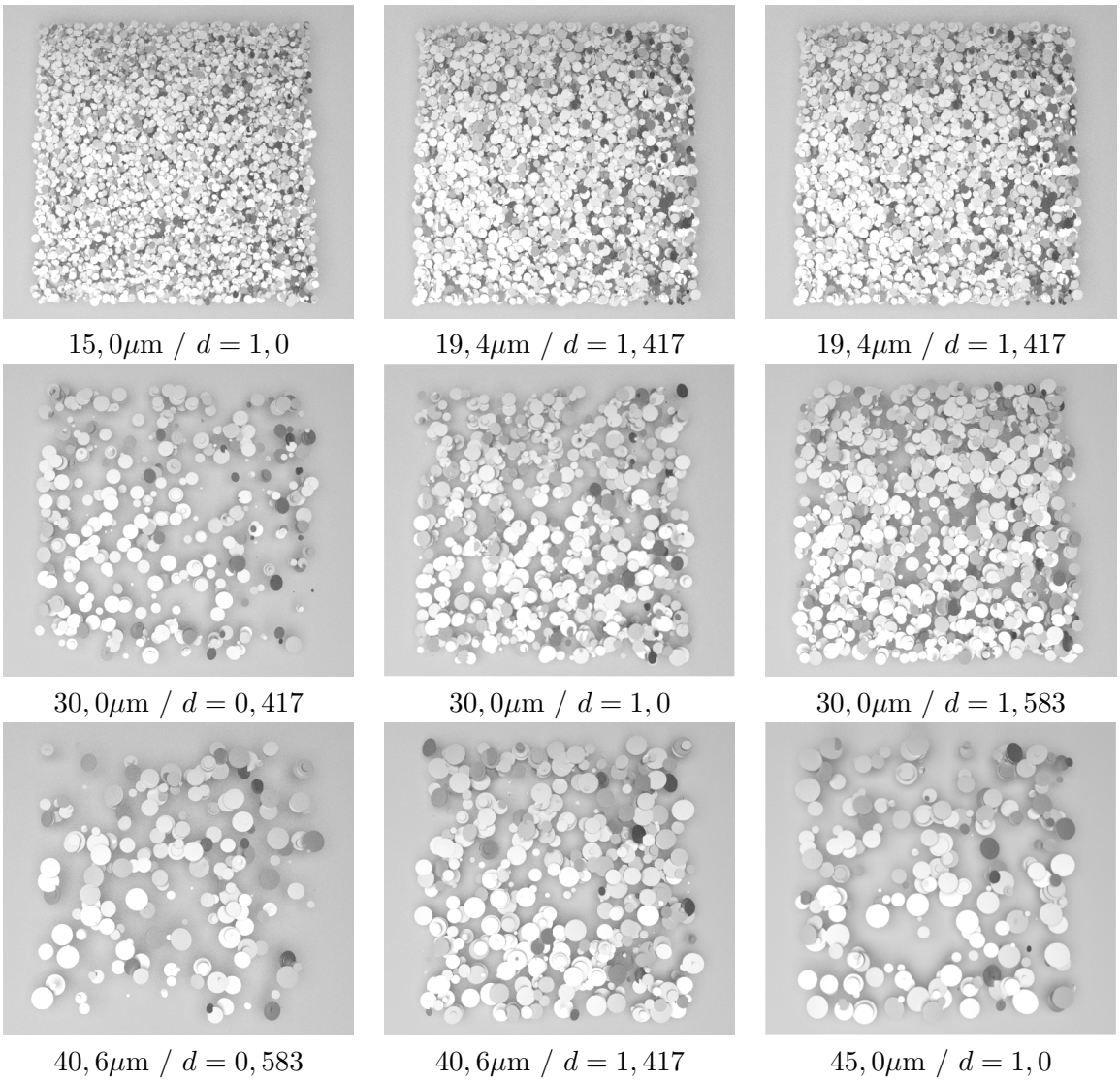


FIGURE 5.10 – Exemples de variations de Micro-structure utilisées dans les expériences sur les échantillons virtuels. Les valeurs de densité et de taille ont été choisies lors de prétests pour s'approcher visuellement des caractéristiques visuelles de l'échantillon réel. Les modèles 3D des ensembles de paillettes sont générés à partir des données fournies par le modèle d'empilement du Centre de Morphologie Mathématique, MINES ParisTech.

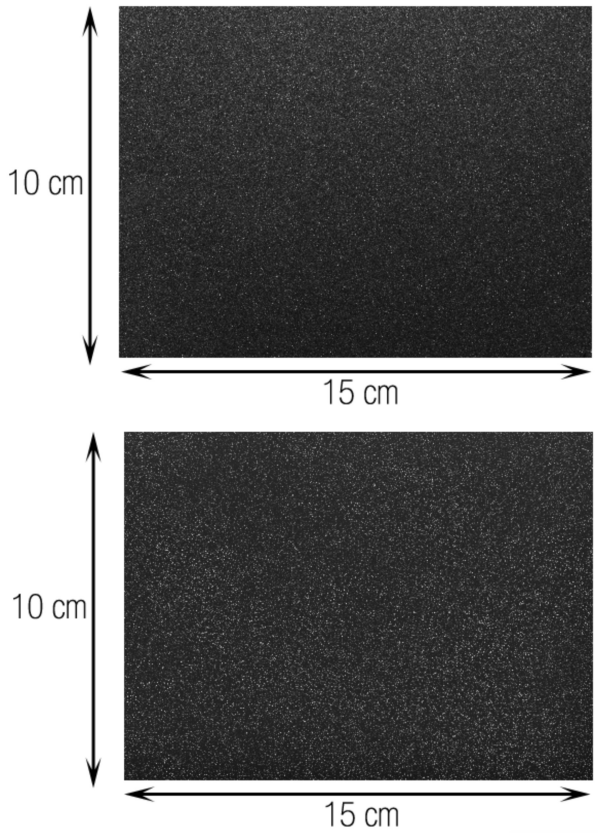
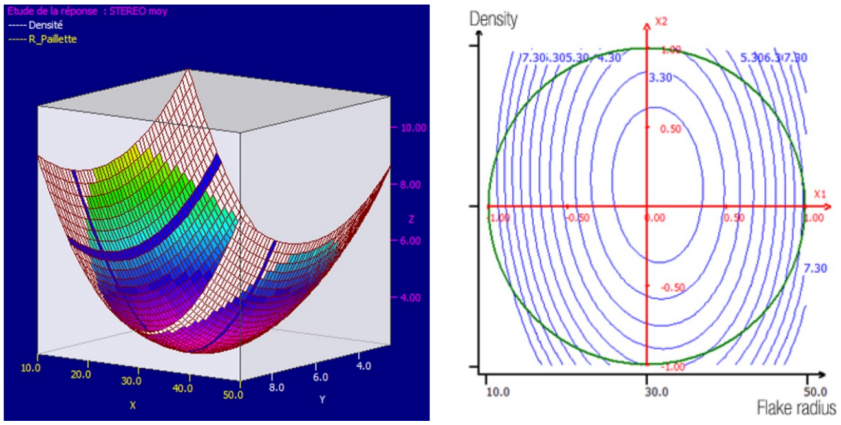


FIGURE 5.11 – Stimuli affichés aux Sujets : En haut, la plaque "Référence" (photographie de la plaque réelle), statique pendant l'expérience, tandis que le matériau de la plaque en bas, la plaque "Variable" (rendu basé sur le modèle physique), varie en taille et densité de paillettes



(a) (b)

FIGURE 5.12 – Courbe de réponse. Sur (a) X représente le rayon et Y la densité des paillettes, en ordonnées est représentée la note de similiarité. (b) est une vue de haut de cette surface, représentée par quelques courbes de niveau. L'aspect ovale des courbes de niveau montre l'influence plus forte du *rayon* des paillettes pour le jugement perceptif de proximité visuelle, le décentrage de cette courbe (le centre correspond aux valeurs moyennes réelles de la densité et du rayon pour l'échantillon réel respectivement 6 et 30μm) montre le degré d'égalisation des métriques entre réel et virtuel. On observe une surestimation du rayon de 4,3% et de la densité de 7,5%

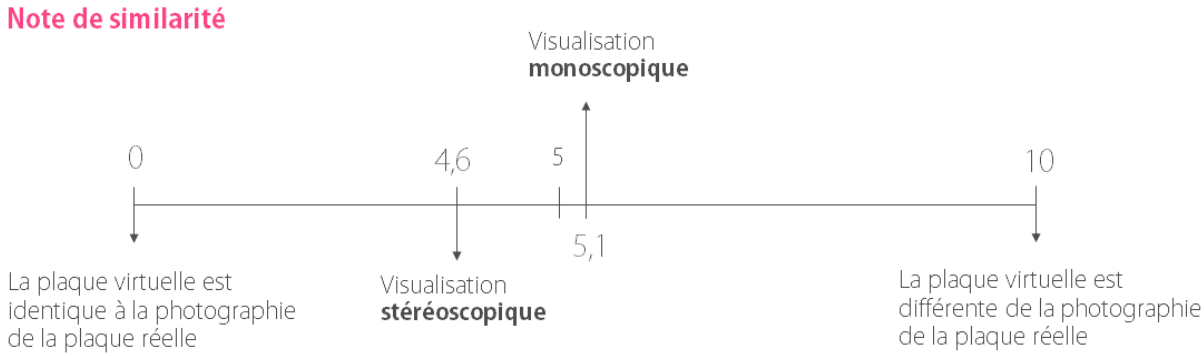


FIGURE 5.13 – Résultats du degré de proximité moyen entre l'échantillon virtuelle et la photographie de l'échantillon réel. Bien qu'il n'y ait pas illusion, pour une égalisation visuelle les métriques réel/virtuel sont perceptivement proches.

5.8 Discussion

Impact pratique sur l'utilisation industrielle Le résultat proche de l'égalisation des métriques permet de qualifier l'outil de visualisation en termes de confiance sur la prédiction de la morphologie. Il prédit une légère surestimation des deux critères de description de la morphologie. C'est à l'utilisateur, ici l'industriel, de choisir si cet intervalle de confiance lui convient. Selon les scénarii de conception, l'outil peut être utilisé pour un une première passe des choix d'échantillons en virtuel, puis, si nécessaire, une réalisation physique des échantillons pour explorer l'apparence plus finement.

Suspension de l'incrédulité La littérature en réalité virtuelle sur la présence mobilise parfois le terme de *suspension of disbelief* pour désigner le fait que bien que l'usager d'un système de RV est conscient du non réalisme d'une scène, il *joue le jeu*, et se comporte de façon réaliste malgré tout. Il semble que l'on observe ici un phénomène de cet ordre. Lorsque l'on observe les résultats de niveau de similarité perçue entre réel et virtuel (Figure 5.13) il est clair qu'à aucun moment l'échantillon virtuel n'est acquis comme une photographie identique à celle de

l'échantillon réel, malgré cela, il semble qu'une partie du percept humain est réaliste, dans la mesure où l'on observe une égalisation des métriques.

De nombreuses questions s'ouvrent sur cette première approche. D'abord la généricité du résultat sur la morphologie n'est pas acquise : la cohérence perceptive réel/virtuelle sur la morphologie reste-t-elle valide pour d'autres paramètres physiques ? Il s'agit de refaire l'expérience avec d'autres échantillons de morphologies différentes. On peut penser que d'autres matériaux ayant des propriétés proches (paillettes spéculaires) seraient bien simulées, avec une réponse réaliste des humains, mais jusqu'à quel point ? Ce résultat est-il robuste à des variations dans la nature des matériaux (du cuivre plutôt que de l'aluminium), des objets observés (remplacer une plaque plane par un objet non plan) ou de la nature de la scène (plutôt qu'une plaque, un véhicule complet à l'échelle) ?

Une extension nécessaire de cette expérimentation est l'usage de la perspective dynamique, c'est à dire la mise à jour de l'image et des perspectives en temps réel en fonction de la position d'observation de l'utilisateur. L'expérimentation décrite dans ce chapitre a été faite sur des images statiques, du fait du temps de calcul nécessaire pour chaque image. Une expérimentation pilote a été réalisé en ce sens avec un taux de rafraîchissement de l'image de l'ordre de 2 à 3 secondes (résolution 1920 par 1080 en stéréo). Les premiers résultats suggèrent que ce taux n'est pas suffisant pour influencer la perception de la morphologie. Ceci ouvre de nombreuses perspectives d'expériences pour, par exemple, chercher si il y a un seuil de taux de rafraichissement à partir duquel la proximité réel-virtuel de ces propriétés visuelles est améliorée ou si une continuité de l'image (25 images par secondes) est nécessaire pour améliorer cette concordance des métriques.

Chapitre 6

Taille et Forme des Objets

La perception correcte de la forme et la taille des objets en réalité virtuelle est centrale à bien des applications. On conçoit bien que la conception d'objets ou de postes de travail pour lesquelles la perception spatiale est importante ne peut se faire dans un système de RV qui n'offre pas une perception maîtrisée de ces aspects. Une perception incorrecte des propriétés spatiales risque de fausser des mesures comportementales : psychomotrices (mouvements de préhension, déplacements) ou des concepts de plus haut niveau, par exemple la facilité à réaliser une tâche. Quel crédit apporter à des acquisitions de mouvement ou des questionnaires de pénibilité dans une simulation de montage en usine ou les distances perçues aux objets sont faussées comparativement à l'environnement réel qui en découlera ?

Dans ce chapitre, j'aborde la question de la perception des tailles et formes d'objets en deux temps : j'expose d'abord la méthode la plus courante de rendu en informatique graphique destinée à simuler les indices de relief monoculaires et binoculaires dans les systèmes basés sur des surfaces de projection, puis je décris une expérimentation de comparaison d'objets réels avec leur équivalent virtuel dans un système utilisant cette technique de rendu. Les résultats et limitations des modèles ouvrent une discussion sur les évolutions possibles des techniques de rendu actuelles.

6.1 Méthode de Génération des Stimuli Visuels en EV

Je considère dans ce chapitre la création des images pour les systèmes de réalité virtuelle basés sur des surfaces de projection de type CAVE. L'objectif premier des méthodes de rendu visuel pour ces systèmes de RV est de transmettre à l'usager des stimuli visuels participant de la perception spatiale. Le choix qui a été fait de quels indices privilégier pour un rendu en RV, entre en cohérence avec les travaux de Nagata [90] puis Cutting et Vishton [25]. Ceux-ci établissent l'importance relative des indices monoscopiques et binoculaires, sous forme de courbes représentant les seuils de perception de profondeur en fonction de la distance d'observation (Figure 6.1).

Ces travaux montrent que la parallaxe binoculaire et la parallaxe de mouvement participent prioritairement de la perception des distances [1]. De fait, les méthodes de rendu en réalité virtuelle ont toutes en point commun d'adresser principalement ces deux indices de la profondeur en proposant un rendu stéréoscopique et une perspective dynamique asservie à la position de la tête de l'observateur.

1. Pour des distances observateur-objet situées entre 0 et 10m

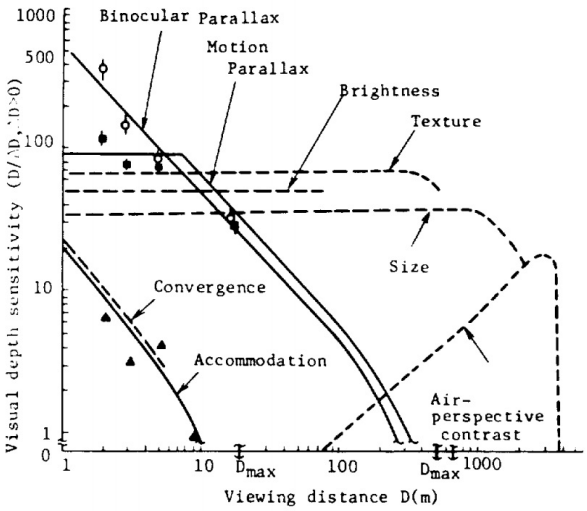


FIGURE 6.1 – Depuis Nagata [90], Courbes des Seuils de perception de la profondeur, fonction de la distance d'observation, pour différents indices visuels - monoscopiques et binoculaires

Pyramide assymétrique de vue Dans les systèmes de type CAVE, la *perspective dynamique* est systématiquement [2] mise en place grâce à une méthode dite de pyramide assymétrique de vue. Elle est formellement décrite par Southard [119] en Section 4, et se conçoit assez facilement si l'on fait appel à l'idée intuitive sous-jacente : la surface d'affichage est une fenêtre sur le monde virtuel, sa surface est la base d'une pyramide [3] dont le sommet est la tête [4]. La surface d'affichage est le plan de projection sur lequel la géométrie des objets de la scène sont projetés [5] La *stéréoscopie* s'obtient en utilisant deux pyramides, un sommet centré sur chaque œil. Pour un système multi-écrans, de type cave, il y a autant de pyramides que de surfaces planes d'affichage. Ce nombre est doublé pour un affichage stéréoscopique. L'implication principale de cette technique sur les propriétés stéréoscopiques est l'absence de parallaxes verticales.

Echelle 1 L'*échelle 1* d'observation est réalisée en mesurant la taille physique de la surface d'affichage, ce faisant, on associe une métrique à la fenêtre d'affichage, ce qui confère de fait aux objets virtuels affichés une métrique réelle.

6.2 Expérience de comparaison visuelle de la taille d'objets réels et virtuels

La pyramide assymétrique de vue est utilisée dans une majorité des systèmes de réalité virtuelle, est-elle garante d'une bonne perception spatiale ? Je décris ici une expérimentation destinée à évaluer si il y a une correspondance perceptive entre les propriétés spatiales (forme, taille) entre un objet virtuel et son équivalent réel. Ces travaux décrits ici ont été réalisés dans le cadre de la thèse de L. Leroy, et décrits dans [77].

2. à ma connaissance toutes les installations de type ecrans de projection font appel à des moteurs de rendu ou de jeux implémentant la perspective suivant la technique de pyramide assymétrique
3. dans le cas rectangulaire
4. plus exactement le point cyclopéen, point situé entre les deux yeux de l'observateur
5. Il s'agit d'une projection en perspective, non orthogonale, avec comme centre le point cyclopéen, ceci réalise de fait un modèle très simple de l'oeil : le sténopé.

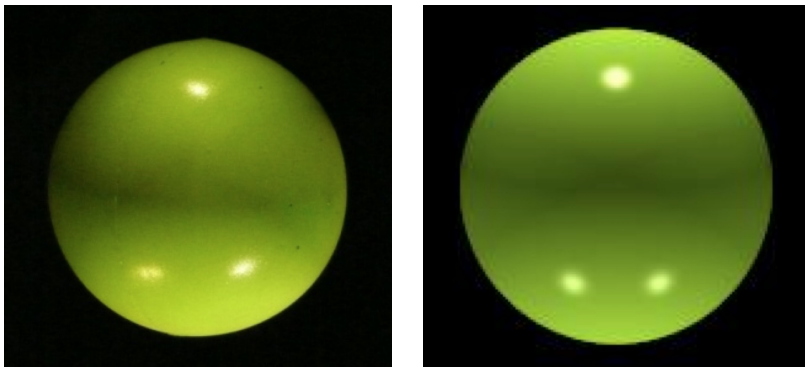
6.2.1 Méthode

L'objet réel de référence dans cette expérience est un objet physique, réalisé sur une imprimante 3D à partir d'un modèle 3D virtuel. Ce dernier est issu d'une modélisation sur un logiciel de conception assistée par ordinateur. On l'expose dans un environnement neutre, c'est à dire un fond noir, sans indices de profondeur extérieurs à l'objet autres que ses interactions lumineuses avec trois sources de lumière. Ce dispositif physique est placé dans une salle de réalité virtuelle, avec un écran d'affichage de grande taille, un système de rendu stéréoscopique actif, un système de capture de mouvement, alimentant le moteur de rendu pour afficher suivant la technique décrite à la section précédente. L'objet réel et l'éclairage associé est reproduit au plus proche dans un environnement virtuel, et affiché à la même distance d'un point d'observation indiqué au sol. Les deux objets sont présentés en Figure 6.2. Ainsi, un sujet est à même d'observer l'objet réel et virtuel en tournant la tête ou le corps, dans des conditions d'observation proches, voir Figure 6.3.

L'expérience que je décris ici fait partie d'une étude plus large sur le rôle des indices du relief, stéréoscopie, perspective dynamique, sur la perception des formes [76]. J'en propose un point de vue axé sur la question de la perception du virtuel comparativement au réel.

L'objet de l'expérience est de déterminer le point d'égalisation subjective [6], et le seuil de discrimination [7] d'un changement de taille sur le virtuel. En d'autres termes, les tailles virtuelles considérées comme identiques au réel, et la plus petite variation de taille perceptible par l'observateur. Ces valeurs caractéristiques de la perception s'obtiennent par des méthodes de psychophysique.

Pour les déterminer, deux expérimentations ont été réalisées. La première avec pour objet réel une sphère de 20 cm. La seconde avec un objet sans symétrie apparente. Chaque sujet est exposé à une série de variations de la taille de l'objet virtuel, en hauteur, largeur et profondeur. La méthode de détermination de seuil est celle des stimuli constants [8]. Pour chaque variation présentée, le sujet doit répondre à la question suivante [9] : *La largeur de [l'objet] virtuel varie. La forme virtuelle est-elle moins large ou plus large ?*. Trois positions de l'objet relativement à l'écran ont été étudiées. Pour chacune de ces positions d'objet virtuel, l'observateur a été déplacé de façon à le garder à une distance constante des deux objets réel et virtuel.



(a) Objet Réel (b) Objet Virtuel

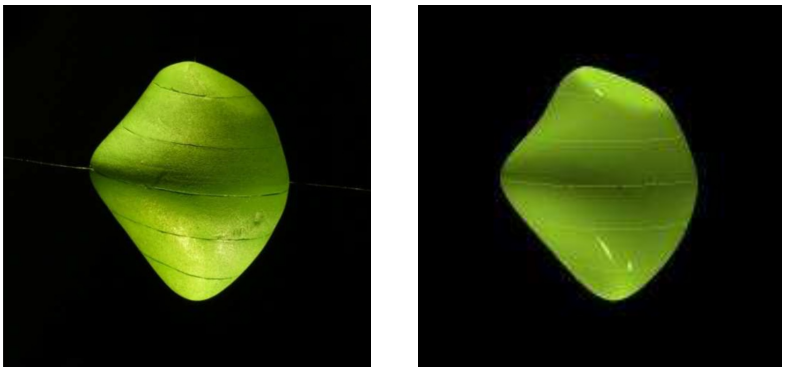
FIGURE 6.2 – (a) (b)

6. ou PSE pour Point of Subjective Equality
7. ou JND pour Just Noticeable Difference
8. pas réguliers des variations positives et négatives autour de la valeur centrale considérée comme théoriquement égale
9. L'énoncé de la question est adapté suivant la dimension considérée, largeur, hauteur ou profondeur et suivant le type d'objet affiché, sphère ou forme sans symétrie

(a) (b)

FIGURE 6.3 – (a) Sujet observant l'objet virtuel (b) En arrière plan, l'objet physique disposé à une distance égale de l'observateur que l'objet réel.

La symétrie de la sphère est un indice de déformation. Pour éviter ce biais, une seconde expérience a été menée selon la même méthode, avec 18 sujets, avec un objet sans symétrie apparente, voir Figure 6.4.



(a) Objet réel sans symétrie (b) Objet virtuel sans symétrie

FIGURE 6.4 – Pour éviter le biais lié à l'utilisation des symétries de l'objet pour la détermination des variations de taille, une seconde expérience a été réalisée, avec un objet sans symétrie apparente.

6.2.2 Résultats

Les résultats sont différenciés selon la dimension de l'objet estimé : d'une part la profondeur de l'objet, d'autre part la hauteur et la largeur. Dans tous les résultats présentés ici, on se place dans le cas de l'objet sans symétrie, en stéréoscopie, avec parallaxe de mouvement asservie à la position de l'observateur.

Profondeur

Les résultats montrent qu'il y a des **différences importantes d'estimation de la profondeur de l'objet virtuel comparativement à l'objet réel**. Elles dépendent de la position de l'objet par rapport à l'écran de projection. On observe une sur-estimation [10] de la profondeur de l'objet lorsque celui-ci est situé sur l'écran, une sous-estimation lorsque celui-ci est placé derrière l'écran (parallaxe positive). Enfin, il y a égalité perceptive sur la profondeur quand l'objet est en parallaxe négative à 50cm de l'écran. Une étude de Bruder et al. [14] sur non pas

10. Sur-estimation : pour que l'objet virtuel soit considéré comme de même taille que l'objet réel, une réduction de sa taille théorique doit être effectuée.

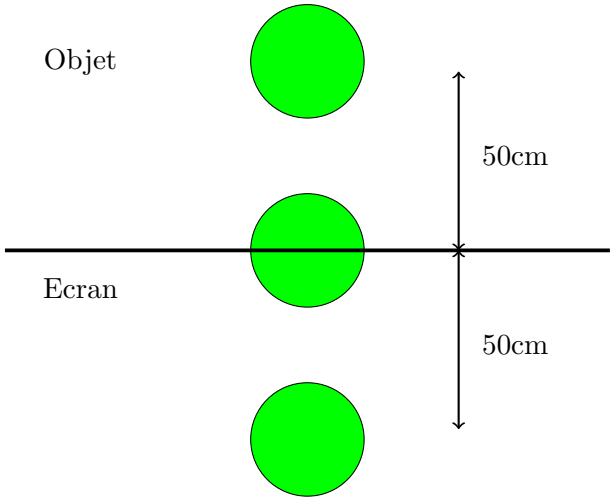


FIGURE 6.5 – Vue de haut des 3 positions d'objet virtuels présentés aux sujets. Le sujet se trouve en bas du schéma, à 1.2m de l'objet observé. Les trois positions correspondent à une parallaxe négative (entre l'écran et l'observateur, à 50cm de l'écran), positive (derrière l'écran) et nulle (sur l'écran)

la profondeur à distance fixe comme dans ce cas, mais sur la distance égocentrique à un objet (en virtuel seul) rejoint ces tendances de sous estimation pour des objets en parallaxe négative.

Le tableau 6.2 présente le point d'égalisation subjective (PSE) et le seuil de discrimination (JND) pour ces trois positions de l'objet virtuel relativement à l'écran d'affichage (Figure 6.5. Ces résultats correspondent à des conditions d'immersion suivantes : avec stéréoscopie et distance interoculaire reportée sur les caméras virtuelles, et la possibilité de se déplacer et donc de profiter des indices de parallaxe de mouvement.

Position	PSE	Estimation	JND
-50cm	113%	Sous-estimation	30%
0cm	94%	Sur-estimation	18%
50cm	100%	Egalité	20%

TABLE 6.1 – Points d'égalisation - PSE- et Seuils -JND-, sur la dimension de profondeur entre l'objet réel et l'objet virtuel, pour les trois positions de la **forme sans symétrie** relativement à l'écran. Ces observations sont faites pour les conditions avec stéréoscopie et perspective dynamique.

Position	PSE	Estimation	JND
-50cm	93%	Sur-estimation	17%
0cm	95%	Sur-estimation	18%
50cm	100%	Egalité	20%

TABLE 6.2 – Points d'égalisation - PSE- et Seuils -JND-, sur la dimension de profondeur entre la sphère réelle et la sphère virtuelle, pour les trois positions de la **sphère** virtuelle relativement à l'écran. Ces observations sont faites pour les conditions avec stéréoscopie et perspective dynamique.

Hauteur et Largeur

L'estimation de des dimensions montre une égalisation de ces dimensions entre virtuel et réel.

Rôle de la Stéréoscopie et de la Parallaxe de Mouvement

La parallaxe de mouvement joue un rôle particulièrement important pour le seuil de perception et ceci quels que soient les conditions : les seuils s'améliorent en moyenne de 46% avec l'usage de la parallaxe de mouvement (46% pour la sphère, et 54% pour l'objet sans symétries). La parallaxe de mouvement, sans stéréoscopie, donne de meilleurs seuils de discrimination comparativement à la stéréoscopie sans parallaxe de mouvement. Cette constatation est à moduler au regard de la dimension de l'objet prise en compte, en effet, la perception des modifications de taille en hauteur et largeur, sont très peu influencées par la présence de la parallaxe de mouvement. Le point d'égalisation subjective sur ces dimensions n'est pas non plus influencé par l'absence ou la présence de cet indice. Il semble que la profondeur soit la dimension la plus sensible à l'indice de parallaxe de mouvement, ce qui ce conçoit bien dans la mesure où les objets utilisés dans l'expérimentation sont convexes et donc que pour apprécier leur profondeur il faille les contourner.

6.3 Conclusion

L'expérience montre des différences importantes d'estimation de la profondeur d'un objet entre virtuel et réel. Les estimations de taille en hauteur et largeur i.e. dans le plan perpendiculaire à l'observateur ne présentent pas de distorsion de perception. Sur ce dernier point, l'expérimentation, qui était principalement axée sur le rôle de la stéréoscopie et la parallaxe de mouvement, a montré que l'estimation en hauteur ou largeur est peu sensible a la présence ou non de ces indices. En résumé, pas besoin de stéréoscopie pour estimer correctement la hauteur et la largeur. Ceci suggère que la taille apparente selon lequel l'objet est perçu est un indice suffisant pour estimer correctement ces dimensions. En ce sens, du fait que l'estimation de profondeur semble faire plus appel aux indices de stéréoscopie et de parallaxe, cette estimation est plus sujette aux approximations et erreurs opérées par les modèles de rendu qui simulent ces indices.

L'expérimentation montre d'une façon générale, comme pour la littérature d'estimation des distances sur les casques de réalité virtuelle, que les systèmes de réalité virtuelle basés sur des surfaces de projection introduisent des distorsions de perception sur les tailles des objets. L'expérience montre que ces distorsions sont dépendantes des *conditions d'observation*, notamment de la position de l'objet relativement à l'écran de projection. On observe que la présence de symétries fortes sur l'objet rapproche l'estimation virtuelle de la taille réelle, mais cela ne représente pas a priori le cas général, car les objets étudiés en conception sont le plus souvent de formes complexes ou avec peu de symétries. De nombreuses expériences peuvent être imaginées explorant, par exemple, le rôle de la taille de l'objet, la présence d'un fond, la couleur du fond, la couleur ou la texture de l'objet, la nature de l'éclairage, ou encore la présence d'autres objets dans la scène.

Différentes limitations perceptives, liées à des spécificités techniques du système utilisé peuvent participer de ces résultats : en particulier la limite de résolution, l'incohérence accomodation vergence, l'absence de parallaxes verticales. La distribution du rôle des ces spécificités techniques sur les résultats de seuil et de point d'égalisation est une question ouverte. On pourrait en particulier explorer l'hypothèse selon laquelle la *résolution* d'écran a un rôle principalement sur les seuils de perception, et l'*incohérence accommodation/vergence* ou de *parallaxe incorrecte* agissent sur les points d'égalisation.

La résolution des écrans est une solution d'ordre technologique, et la question de l'amélioration des seuils peut se résoudre par l'arrivée d'écrans dont la taille du pixel est inférieure à l'acuité

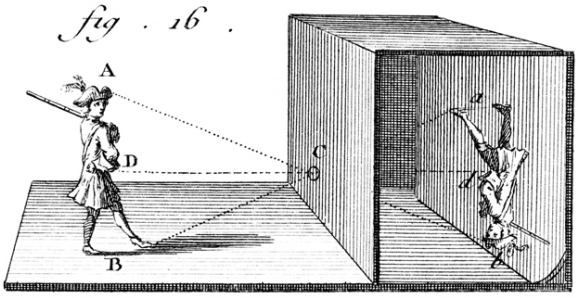


FIGURE 6.6 – On utilise encore le modèle du sténopé pour générer des paires stéréoscopiques dans les systèmes de type CAVE. Une image du sténopé ou *Camera Obscura* depuis L'Encyclopédie [26]. Le modèle employé pour réaliser les projections sur les surfaces d'affichage de type CAVE est particulièrement simple, c'est celui du sténopé. Il revient à considérer que la rétine est plate. On peut émettre l'hypothèse que déployer des modèles plus complexes de l'œil permettrait de réintégrer des indices de parallaxes verticales et horizontales plus proches de la vision réelle et ainsi améliorer la perception des caractéristiques géométriques des objets.

visuelle humaine. La question de l'égalisation subjective, qui est le cœur du problème soulevé dans ce chapitre dépend plus des *modèles* de rendu. L'absence de parallaxes verticales est liée au choix d'utiliser des caméras parallèles pour générer les paires stéréoscopiques et simuler la disparité rétinienne dans l'œil de l'observateur. Une étude montre que pour l'usage de caméras dont le capteur est un plan (qu'elles soient réelles ou virtuelles) , la perception des distances est améliorée en l'absence de parallaxes verticales [132]. Dans le même temps, en vision réelle, les parallaxes verticales sont connues pour participer de la perception spatiale [13]. J'émets l'hypothèse que pour introduire dans l'information de disparité rétinienne ces parallaxes verticales, une piste possible serait d'utiliser un modèle de caméra ayant un capteur non plan, prenant en compte la forme de la rétine. Le modèle de pyramide assymétrique utilisé pour calculer les paires stéréoscopiques est un modèle très simple de l'œil humain, c'est celui du sténopé, (Voir en figure 6.6), il considère une caméra virtuelle dont la surface est un plan. Mon hypothèse est que l'on peut introduire des parallaxes verticales au niveau de la forme du capteur et non l'orientation de la caméra virtuelle. Ceci nécessite d'introduire un suivi continu de la vergence, l'*eye-tracking*. Une autre origine possible de la distorsion de perception est l'incohérence accomodation/vergence. Le problème est connu et des solutions technologiques apparaissent, sans que l'on en connaisse encore les limites perceptives : il s'agit en particulier des affichages plénoptiques ou *light field displays* qui permettent de retrouver une cohérence entre accomodation et vergence, en recréant le front d'ondes dans le champ visuel.

Avant d'obtenir des résultats de recherche sur de nouvelles techniques et méthodes de rendu, et de leur éventuelle amélioration sur les aspects perceptifs, que faire ? D'un point de vue applicatif, ce travail suggère une démarche de spécification en amont de chaque système de réalité virtuelle. L'expérience menée dans ces travaux peut s'imaginer comme une procédure préalable à l'usage d'un système de réalité virtuelle, dans un contexte industriel par exemple. Avant de commencer à utiliser tout système de RV il conviendrait de réaliser ces tests avec les objets types qui seront présentés dans les cas d'applications, en particulier en explorant la ou les configurations spatiales types de ces objets. On en construirait une table de confiance présentant les points d'égalisation pour chaque type d'objet et pour une série de positions types. Cette table de confiance accompagnerait ainsi le système de réalité virtuelle au cours de ses usages futurs et permettraient de valider, ou non, certains résultats d'expérience.

Chapitre 7

Geste de Manipulation

Dans quelle mesure un système de RV peut-il être représentatif des gestes réalisés par l'homme ? Je me penche ici sur le geste de manipulation d'objets. Le geste de manipulation repose sur la combinaison d'informations sensorielles issues de différents canaux, visuel, haptique, tactile voire sonore. Force est de constater que les systèmes de réalité virtuelle, notamment ceux qui sont destinés à un public plus large, prennent des libertés au regard de la complexité de ces indices sensori-moteurs pour la manipulation. En effet, il en manque souvent un bon nombre : les systèmes acquérant les mouvements des doigts de la main ne sont pas la règle, loin de là, la présence de systèmes à retour d'effort non plus. La règle générale est plutôt celle de la métaphore de la main virtuelle [1], loin de représenter cette finesse de manipulation. Il semble pourtant possible de faire réaliser à l'utilisateur un geste qui semble naturel, même avec des retours sensoriels incomplets et des gestes minimalistes, un exemple en est l'usage du mouvement des bras ou de tout le corps dans les jeux vidéo grand public popularisé par les consoles de jeux. Dans ce contexte, la question générale que j'aborde dans ce chapitre est celle-ci : *quelle est l'influence des limitations de d'immersion sur la nature du geste ? Dans quelle mesure une immersion limitée permet de garder un geste réaliste, proche du geste nominal ?* J'aborde dans ce chapitre le rôle de la rétroaction visuelle et de l'apparence visuelle des objets sur les gestes de manipulation.

7.1 Contexte : Interaction par gestes définis par l'utilisateur

Je mobilise des travaux de recherche réalisés dans le cadre d'un projet de recherche, d'une thèse [64] et décrits également dans [66]. J'en propose dans ce document une perspective sensiblement différente. J'expose dans cette section le contexte de ces travaux et expose ensuite le changement de perspective, axée sur la comparaison entre un geste nominal et un geste pertubé par une immersion incomplète.

Le contexte des recherches est celui de l'adaptation des interfaces *individuellement* à chaque l'utilisateur. L'adaptation de l'interface est motivée par un cas d'usage : la rééducation cognitive et fonctionnelle. On cherche à faire réaliser une activité à un patient pour l'aider à reconstruire des habiletés motrices ou cognitives, alors que ses capacités motrices peuvent ne pas

1. La métaphore de la main virtuelle [102] consiste, pour la saisie et la manipulation d'objets à faire coïncider un avatar de la main (main, pointeur, manette virtuels) et l'objet visé, et dans le même temps appuyer sur un bouton présent sur un périphérique maintenu. Pour la manipulation, tant que le bouton reste pressé, les mouvements de l'objet sont asservis aux mouvements de la main. Ceci est bien loin de représenter la finesse de contact entre les doigts et les objets. Des modèles de manipulation multidigitaux [71], et des environnements proposant la manipulation multidigitale avec une gestion de la dynamique de contact [21] existent, mais ne se retrouvent que dans des systèmes spécialisés, et n'existent pas dans des installations grand public.

être suffisantes pour les réaliser dans la vie quotidienne. Pour permettre au patient de réaliser des activités de la vie quotidienne en réalité virtuelle avec des gestuelles qui lui sont propres, l'approche est de faire apprendre au système les gestes que chaque utilisateur peut réaliser à un moment donné de sa rééducation, et de lui permettre de manipuler des objets avec ces gestes, même incomplets ou d'amplitude réduite. Le pari des approches de rééducation en virtuel est d'améliorer progressivement la réalisation motrice des gestes et/ou leur l'agencement temporel et ainsi de favoriser ensuite leur bon déroulement dans l'environnement réel.

En ce sens, une approche de définition des gestes par l'utilisateur a été mise en place [66]. Ce système s'utilise en deux phases (voir Figure 7.1), la première permet à l'utilisateur de créer les gestes qu'il souhaite : chacun peut définir le geste qu'il veut associer à une action, et le système apprend à reconnaître ce geste via un algorithme d'apprentissage artificiel. Dans une seconde phase d'interaction proprement dite, le même geste est réutilisé pour réaliser des tâches. Lors de la phase d'interaction, le système réalise, via une reconnaissance de la progression du geste [2], des rétroactions visuelles continues. Du fait de l'adaptation en amont par la définition du geste par l'utilisateur, celui-ci pourra réaliser des actions dans l'environnement virtuel et voir l'effet de ses gestes sur les objets de la scène.

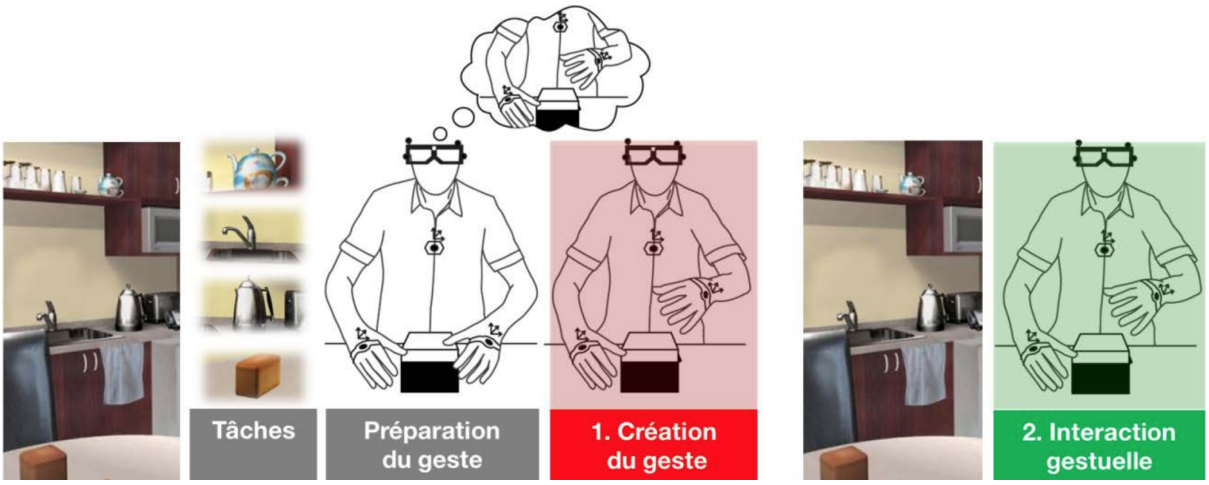


FIGURE 7.1 – Illustration de l'approche Udig pour *User Defined Interaction with Gestures*, qui permet à l'utilisateur de définir des gestes associés à chaque action réalisable dans l'environnement virtuel, puis de les utiliser dans une phase d'interaction. L'usage de l'apprentissage artificiel permet d'assurer un suivi continu d'un geste quelconque et de l'associer à la manipulation d'un objet virtuel en s'assurant que l'animation de ce dernier suit la progression du geste. Cette démarche permet d'associer des gestes ayant une amplitude ou une forme très différente du geste nominal pour l'objet ou l'action considérée.

J'attire l'attention du lecteur sur deux caractéristiques importantes de l'approche : d'une part, on s'intéresse à des gestes de manipulation d'objets, en ce sens chaque geste est créé en relation avec un objet spécifique, représentant un objet de la vie courante. D'autre part, tant à la création du geste qu'à la phase d'interaction, l'objet virtuel est uniquement représenté visuellement, mais il n'y a pas de contrainte mécanique associée. C'est à dire qu'il n'y a pas de retour d'effort, actif ou passif, le geste est réalisé *dans le vide* sans support physique. Le geste défini peut donc avoir une *amplitude spatiale* ou d'une *forme* différente du geste qu'exigerait l'objet physique, ce qui est le besoin même dans le cas d'application. A la phase d'interaction, l'usager doit réaliser un geste proche du geste défini, le système d'apprentissage est à même d'en suivre la progression, de ralentir ou geler celle-ci si le geste de correspond pas au geste appris. Le projet a également considéré un autre cas d'usage, celui des arts numériques, pour lesquels l'objectif est de pouvoir associer des gestes quelconques créés par l'utilisateur à des évènements visuels ou sonores. Ce

2. nous avons utilisé l'outil *gesture follower* proposé par Bevilacqua et al. [8] pour le contexte de l'interaction musicale.

travail a démontré la faisabilité et l'utilisabilité de cette proposition d'adaptation *udig* (user defined interaction with gestures) dans ces cas d'usage.

Lecture de ce travail par rapport à la réponse réaliste.

Je propose une lecture de ce travail axée sur l'étude de la différence entre le geste initial réalisé par les utilisateurs lors de la phase de création et le geste tel que réalisé dans la phase d'interaction. La démarche que je propose consiste à observer les altérations du geste au regard de modifications des caractéristiques de l'environnement. Je qualifie cette démarche de *déconstruction* car l'idée est d'enlever ou altérer graduellement certaines rétroactions proposées dans l'EV. La question sous-jacente est : jusqu'à quel niveau de déconstruction des rétroactions peut-on garder un geste cohérent par rapport au geste initial ? Quelle est l'information minimale nécessaire à un geste identique ou proche du geste initial ? J'entends ainsi alimenter ma question centrale de la réponse réalise, en étudiant quelles informations visuelles sont influentes lors de réalisation d'un geste en RV.

Avant de décrire ces expériences, je rappelle la définition de deux termes. Le geste *initial* ou *créé*, est celui est inventé par le sujet, et appris par le système. Le *geste d'interaction* est celui qui est réalisé ensuite dans la phase de manipulation de l'objet, et dont la progression est suivie par le système. La démarche est de comparer ces deux gestes, en considérant le premier comme le geste nominal. Dans les deux expériences, on étudie les transformations du geste d'interaction au regard de modifications des conditions d'environnement ou d'informations fournies.

7.2 Expérience 1 : Stabilité des gestes au regard de l'affordance et la colocalisation

Dans cette première expérience, on s'attaque à deux caractéristiques de l'environnement virtuel pouvant influencer la nature et la stabilité des gestes : l'apparence visuelle des objets, et la distance de manipulation. L'expérience étudie deux variables : la présence ou non d'*affordances* visuelles, et l'usage de la manipulation colocalisée, ou non.

La première expérience se propose d'évaluer la remémoration des gestes. La remémoration porte sur des gestes créés par chaque sujet dans une première phase, au vu des apparences visuelles de boîtes présentées. Dans la phase d'interaction, le sujet doit se souvenir du geste qu'il a créé précédemment, et le réaliser pour ouvrir chacune des boîtes vues précédemment, aléatoirement présentées. La contrainte imposée aux sujets est de créer un geste différent pour chaque boîte. La tâche nécessite donc de réaliser au maximum 6 gestes différents. La Figure 7.2 illustre le système utilisé. Si l'objectif affiché de l'expérience était la remémoration, ma proposition est de relire ces résultats en considérant la remémoration comme une proximité spatiale entre le geste d'interaction et le geste crée. C'est d'ailleurs en termes de proximité spatiale que la remémoration a été évaluée.

7.2.1 Variables indépendantes

L'expérience étudie trois variables indépendantes : la présence ou non d'affordances (A1, A0), l'usage ou non de la co-localisation (C1, C0) , et le nombre de gestes différents à créer et utiliser (2G, 4G, 6G). Les *affordances* sont les indices visuels que présente un objet et qui préfigurent son mode de fonctionnement. Dans cette expérience, les boîtes sont représentées soit avec des affordances explicites, condition A1, soit simplement différenciées selon leur couleur, condition

FIGURE 7.2 – Expérimentation sur la remémoration des gestes.

A0. La *colocalisation* désigne la superposition de l'espace de visualisation et de manipulation. L'expérience propose une manipulation co-localisée (C1) et une à distance (C0). Pour la manipulation à distance, l'espace de visualisaiton et de manipulation sont distants de 1m, ce qui signifie le sujet réalise un geste décalé d'un 1 mètre par rapport à l'objet. Ces conditions sont illustrées en Figure 7.3. La figure 7.4 schématise le plan d'expérience. Enfin, cette expérience a été réalisée sans rétroaction visuelle, la boîte restant fermée lors du geste d'ouverture.

7.2.2 Mesures

Je retiens deux indicateurs pour qualifier la stabilité du geste. La *distance euclidienne* moyenne entre les deux trajectoires : geste créé, geste d'interaction. Enfin, le plus haut *taux de reconnaissance* renvoyé par le système lors de la réalisation d'un geste.

7.2.3 Résultats

Les *affordances* améliorent globalement la proximité du geste d'interaction au geste créé. Indépendamment de la colocalisation, les résultats montrent une influence significative de l'affordance sur la distance euclidienne (figure 7.5) et le taux de reconnaissance (figure 7.6). pour la condition A1. Ce résultat est caractéristique du fait que les gestes sont mieux mémorisés en présence d'affordances. Les affordances rendent la proximité du geste (distance, taux) indépendante du nombre de gestes à mémoriser, alors que celle-ci chute en son absence.

Ensuite, on ne trouve pas d'influence de la condition de *colocalisation* sur la stabilité des gestes. On observe une tendance au décalage du geste d'interaction dans la direction de la boîte. En effet, le taux de reconnaissance est stable car indépendant de la position du geste dans l'espace, cependant la distance euclidienne est augmentée dans ce cas. Ceci est dû à un comportement de décalage du geste, quasi systématique, qui semble montrer que les sujets ont envie, consienmment ou inconsciemment, de réaliser leur geste au plus près de l'objet, et en ce sens décalent leur geste dans sa direction.

La figure 7.7 illustre quelques cas emblématiques des modifications du geste d'interaction comparativement au geste créé. Les gestes correctement reproduits (cas A, B, C, D, E, F), les gestes oubliés ou mal mémorisés du fait de l'absence d'affordance (cas G, H), geste correct mais décalé du fait de la non-colocalisation (cas B, D).

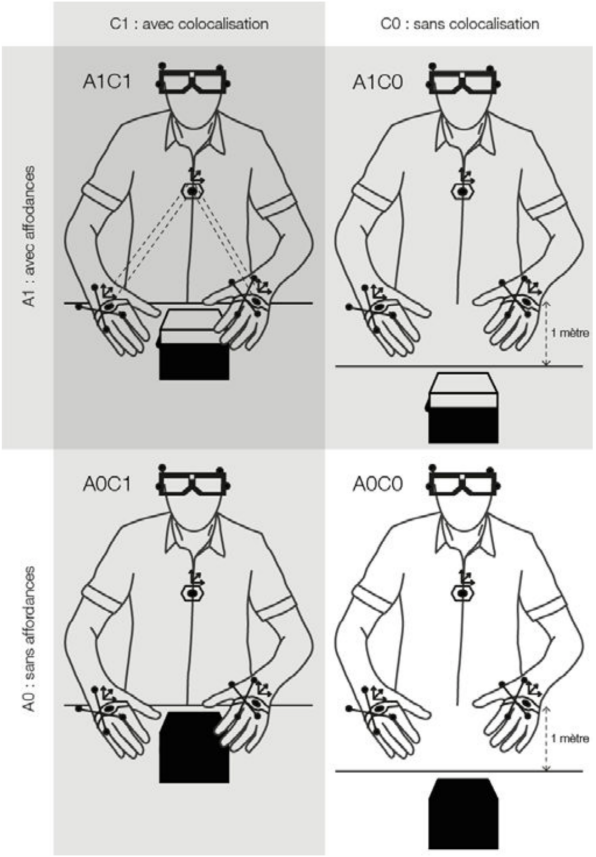


FIGURE 7.3 – Illustration des variables indépendantes étudiées dans l'expérience : on s'intéresse au rôle sur la stabilité du geste de la colocalisation (avec C1, sans C0) et des affordances (avec A1, sans A0)

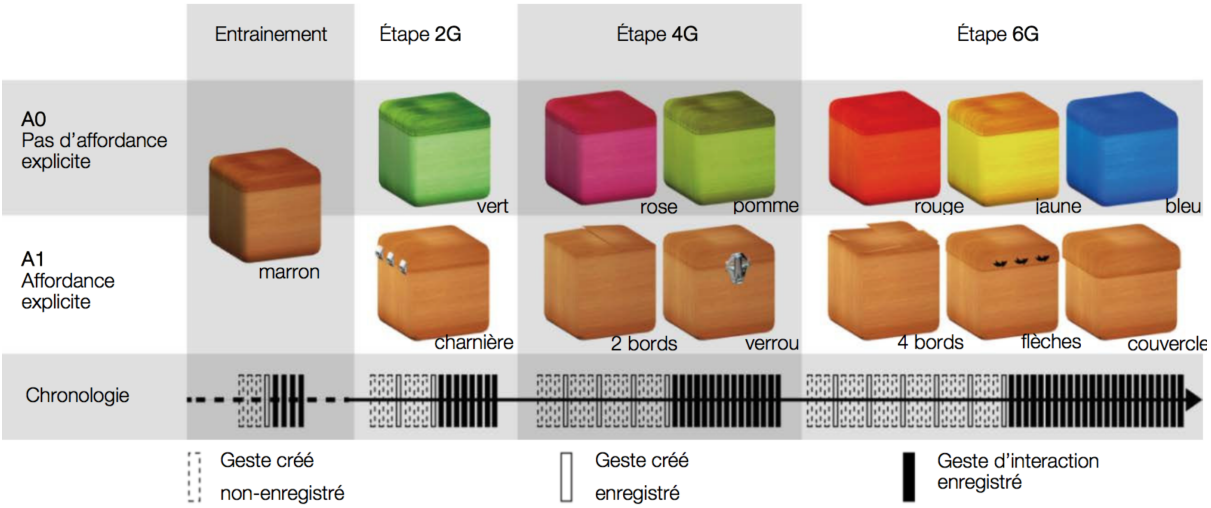


FIGURE 7.4 – Déroulement de l'expérience. 21 sujets ont participé à l'expérience, trois sessions sont imposées comportant respectivement 2, 4 et 6 boîtes (2G, 4G, 6G). Pour chaque session, il y a une phase de création des gestes, puis une phase de réutilisation de ces gestes sur les mêmes boîtes. Pour chaque session, la moitié des boîtes sont présentées avec affordances (A1), l'autre moitié présente des boîtes de couleur (A0). On étudie 1) la capacité des sujets à se remémorer les gestes en observant les indicateurs spatiaux de proximité des gestes réalisés lors de la phase d'interaction comparativement aux gestes crées initialement.

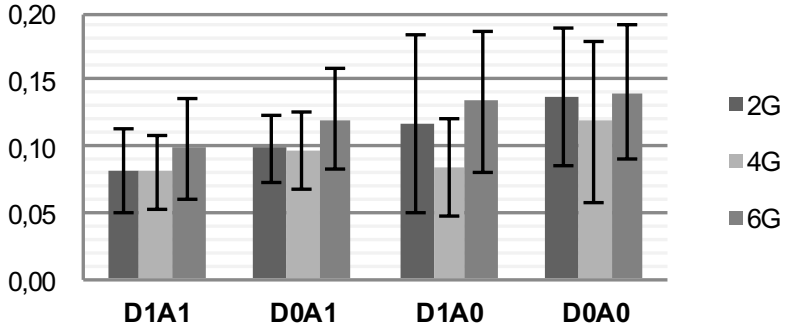


FIGURE 7.5 – Distance euclidienne moyenne entre geste créé et geste d'interaction

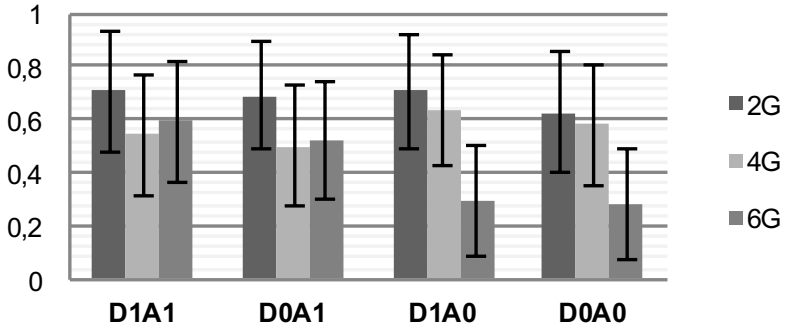


FIGURE 7.6 – Taux moyen de reconnaissance du geste par le système d'apprentissage automatique.

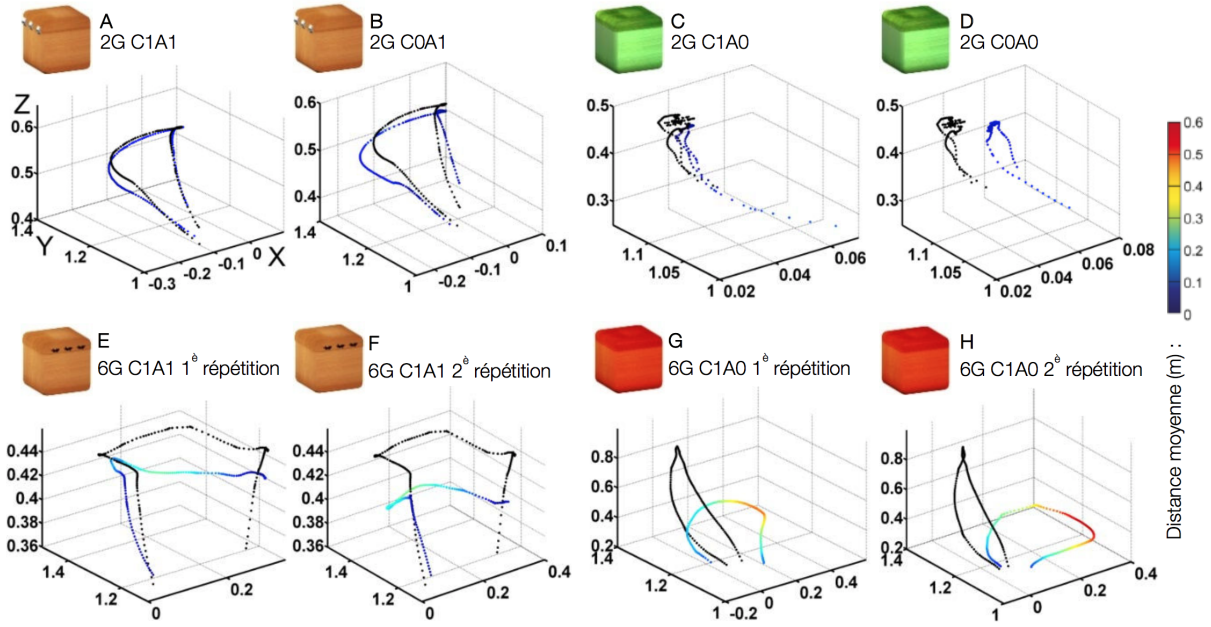


FIGURE 7.7 – Comparaison entre les trajectoires de gestes crées (en noir) et gestes reproduits à l'interaction (distance au geste créé codée en couleur) dans les différentes conditions étudiées. On y voit les cas emblématiques des évolutions du geste : les gestes correctement reproduits (cas A, B, C, D, E, F), les gestes oubliés ou du fait de l'absence d'affordance (cas G, H), geste correct mais décalé du fait de la non-colocalisation (cas B, D)

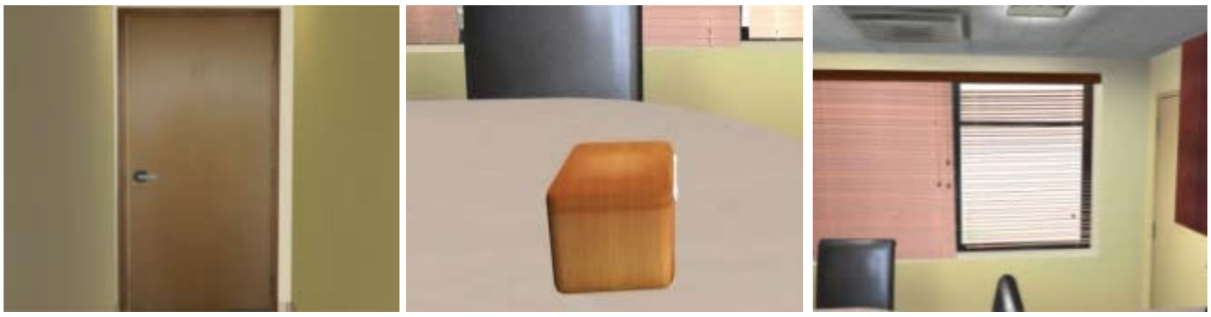


FIGURE 7.8 – Trois tâches sont à réaliser dans l'EV, ouvrir une porte, une boite et un store.

7.3 Expérience 2 : Stabilité des gestes au regard de la rétroaction et de la fatigue

La première question abordée dans cette expérience est celle de la rétroaction visuelle. Elle est motivée par la nature du suivi de mouvement utilisé : en effet, les méthodes d'apprentissage artificiel sont une solution potentielle pour la caractérisation et le suivi des gestes en réalité virtuelle. Dans le cas classique où l'on suit les mouvements par capture de position absolue, l'animation de l'objet manipulé est une question relativement simple : elle est simplement couplée en position et orientation de la main ou cadrée par des modèles cinématiques ou dynamiques. Dans le cas où le geste est suivi par un système d'apprentissage, dont l'objet est justement d'accepter des gestes dont l'échelle ou la forme peut être non congruente aux mécanismes de l'objet manipulé, la façon dont ce mécanisme est animé visuellement est une question ouverte. On cherche dans cette expérience à *déconstruire* les caractéristiques du retour visuel pour en comprendre les composantes qui participent d'une cohérence entre geste d'interaction et geste créé.

La possibilité de manipuler des objets *dans le vide* en virtuel pose des questions de fatigue, de stabilité et répétabilité du geste. En effet, une des différences importantes entre le geste réel de manipulation d'objets et les gestes correspondants réalisés dans un EV [3] est le risque accru de fatigue musculaire liée l'absence de support physique. C'est un phénomène connu des communautés d'interaction 2D et 3D connu sous les nom de *gorilla arm* ou *bras de gorille*. Ces communautés cherchent à l'évaluer [56] et le minimiser. Ceci amène la seconde question étudiée dans cette expérience : si l'on souhaite minimiser la fatigue musculaire de l'utilisateur on peut tout simplement lui proposer d'appuyer son bras sur un support. Si l'on fait ce choix d'utiliser un support physique pour le bras, peut-on malgré tout s'attendre à un geste représentatif ?

7.3.1 Tâche

Chaque sujet est invité à effectuer trois tâches de manipulation : ouvrir une porte, une boîte et un store de fenêtre (Figure 7.8). Dans la phase de création du geste, une animation est exposée, celle-ci démarre dès que la main de l'utilisateur s'approche de l'objet. La consigne donnée est de réaliser un geste en tâchant de le caler spatialement et temporellement à l'animation d'ouverture de l'objet. On joue sur deux variables : la rétroaction visuelle et l'usage d'un support sous le coude pour minimiser la fatigue.

3. Il existe clairement différents niveaux d'écologie du geste de manipulation en virtuel suivant que le système offre uniquement un retour visuel, ou différents niveaux de retour haptique. La question reste cependant pertinente pour la vaste majorité des systèmes car les supports mécaniques au geste sont souvent réduits en virtuel.

7.3.2 Variables indépendantes

Type de rétroaction visuelle

Dans l'expérience précédente étudiant le geste au regard des affordances et de la colocalisation, il n'a pas été affiché de rétroaction visuelle, la boîte restant fermée lors du geste d'ouverture. On introduit ici une *rétroaction visuelle* couplée au geste. Ceci veut dire que le sujet sera exposé à un objet présentant une animation visuelle de son fonctionnement lors de la phase de création, et également lors de la phase d'interaction. Le système de reconnaissance de geste mis en place suit l'évolution du geste d'interaction [8], on peut ainsi proposer une rétroaction visuelle couplée au geste. Différentes variations de couplage visuel ont été mises en place (Figure 7.9), selon les caractéristiques suivantes :

Avec Couplage

— Discret

Affichage des deux positions extrêmes en début et fin de geste, noté **Bool**.

Pourcentage d'avancement affiché par paliers de 20% noté **Pa%**.

Mouvement de l'objet affiché par paliers de positions discrètes noté **PaAn**.

— Continu

Mouvement continu de l'objet, asservi au taux de complétion du geste noté sans gain de déplacement **AnCo**

idem, avec gain de déplacement de 1.2, choisi arbitrairement, noté **AnC+**.

Sans Couplage Un cas témoin, consistant en une animation en boucle ouverte, sans asservissement au mouvement, et qui débute à partir du premier contact avec l'objet virtuel. Cette condition est notée **TANC** pour *témoin animation non couplée*.

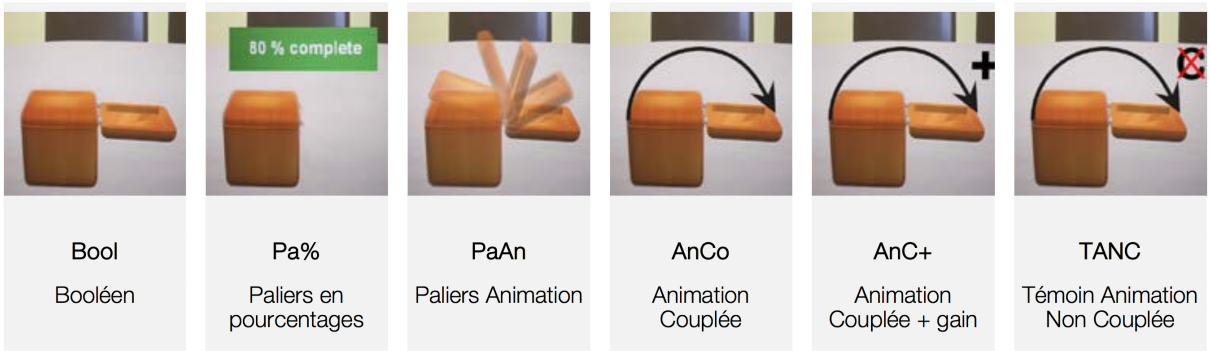


FIGURE 7.9 – **Type de rétroaction visuelle**. Différentes rétroactions visuelles ont été implémentées, **Bool** : la boîte est présentée toujours fermée jusqu'à la fin du geste ou sa position ouverte est affiché, **Pa%** présente un pourcentage d'ouverture, variant par paliers discrets, sans animation visuelle, **PaAn** : animation par paliers, **AnCo** : Animation couplée au gestes avec un gain 1, **AnC+** : idem, avec un gain ¿ 1, **TANC** : Animation non couplée, c'est à dire une animation se déroulant automatiquement à partir du premier contact.

Usage ou non d'un support

L'usage du support est destiné à réduire la fatigue. La Figure 7.10 montre les deux cas : un geste libre (noté AR pour Amplitude Réaliste), et un geste réalisé avec le coude posé sur un accoudoir (noté AF pour amplitude faible). Dans les deux cas la manipulation se fait sans co-localisation (visuelle et proprioceptive) car l'objet se trouve hors de portée de la main.

FIGURE 7.10 – **Usage ou non d'un support**. Comment le geste évolue-t-il comparativement au geste initial en manipulation libre (à gauche) et avec un support destiné à minimiser la fatigue ? Ces deux conditions sont étudiées dans l'expérience et illustrées ici, avec un utilisateur ouvrant une porte virtuelle

7.3.3 Mesures

On retient trois descripteurs de la proximité du geste initial et du geste d'interaction.

— Le **rapport du travail mécanique** entre le geste d'interaction et le geste initial. On approxime le travail par la distance parcourue.
— Le **rapport de durée** entre ces deux gestes.
— Le **taux de complétion** du geste mesuré par le système d'apprentissage. Il combine mouvement de translation et de rotation. En ce sens, un mouvement qui suit parfaitement le geste initial en translation mais pas en rotation aura un taux de complétion potentiellement inférieur à un geste qui aura suivi imparfaitement ces deux composantes.

Des questionnaires axés sur le Réalisme de l'interaction, la réactivité du système, la motivation à l'usage, le caractère agréable et la facilité d'usage ont été soumis aux participants.

7.3.4 Résultats

Rétroactions

En premier lieu, les résultats montrent que le type de rétroaction influence fortement le geste des sujets. L'absence de couplage est immédiatement perçue. Dans ce cas de rétroaction, le travail, le temps, le taux sont très réduits comparativement au geste créé. La plupart des sujets font la démarche de suivre (très partiellement comme le montrent les indicateurs) l'animation avec leur geste, certains ne le font même pas et restent statiques. L'absence de couplage est parfois verbalisée par les sujets (*"tiens, mais cela ne suit pas mes mouvements"*).

Certains couplages favorisent une réponse réaliste sur le temps, d'autres sur le travail. L'observation des valeurs moyennes des indicateurs désigne le geste avec la rétroaction **AnCo+** (couplage continu avec gain de déplacement supérieur à 1) comme le plus proche du geste créé **en travail** (figure 7.11) et pour le temps, c'est la rétroaction avec pas d'animation **PaAn**. Dans ce contexte il est difficile de conclure qu'une rétroaction spécifique est plus favorable à une correspondance du geste d'interaction au geste initial. Les préférences subjectives des sujets vont clairement vers AnCo et AnC+ considérés les plus proches d'un retour visuel réaliste.

Si l'on s'intéresse à l'évolution au cours des répétitions du geste, on observe ce qui peut s'apparenter à un comportement exploratoire du système par les usagers. Sur la figure 7.12, le temps de réalisation du geste décroit au fur et à mesure des répétitions. Sur l'ensemble des essais, l'analyse statistique ne montre pas de différence significative entre les répétition 3, 4 et 5 . Par contre, elle montre une différence significative entre ces trois dernières répétitions et la première. On note que cette stabilisation apparente du temps sur les 3 derniers essais, s'éloigne du temps du geste initial.

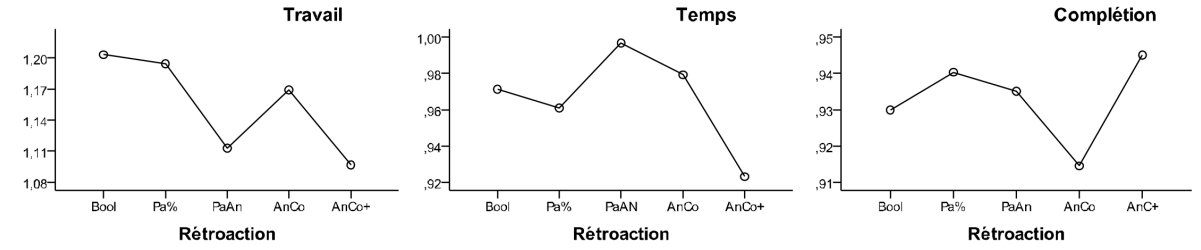


FIGURE 7.11 – Rapport du Travail mécanique geste d'interaction/geste créé, Rapport de durée entre ces deux gestes

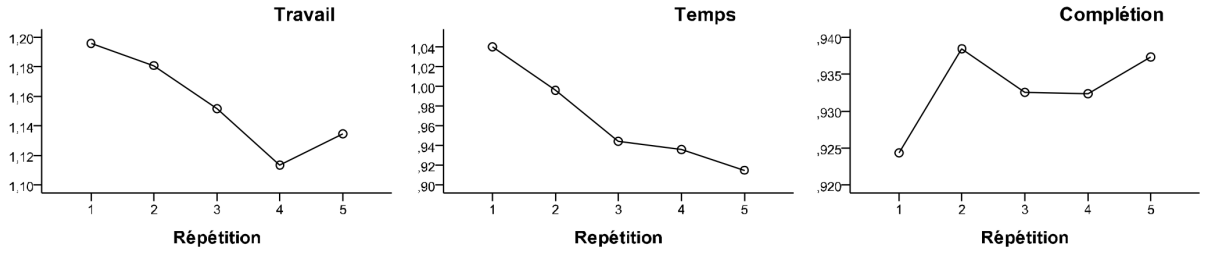


FIGURE 7.12

On peut observer des variations importantes des indicateurs de travail, temps, et taux de complétion au fur et à mesure des répétitions (figure 7.13), j'aborde dans la discussion l'hypothèse qu'il s'agit aussi d'un comportement d'exploration des invariants dans la rétroaction.

Usage d'un support

Toutes rétroactions et répétitions confondues, le geste d'amplitude faible (AF) requiert significativement moins de travail que celui d'amplitude réaliste (AR), il est exécuté plus rapidement, et son taux de complétion est supérieur au geste d'amplitude réaliste. En décomposant les distances parcourues en translation et rotations, on découvre que le taux de complétion est supérieur malgré une distance parcourue plus faible pour AF que pour AR. Celle-ci est compensée par une accentuation des mouvements en rotation du poignet. Comment interpréter ce taux de complétion supérieur au geste d'amplitude réaliste ? Il semble que le comportement des usagers, en situation de geste limité du fait d'un support fixant le coude, est d'exagérer le mouvement en rotation du poignet, comme pour pallier le manque d'amplitude en translation par une amplitude plus importante en rotation.

En ce qui concerne la question de la proximité du geste d'interaction au geste initial sur ces critères, seul le temps de réalisation du geste est proche, pour la condition sans support.

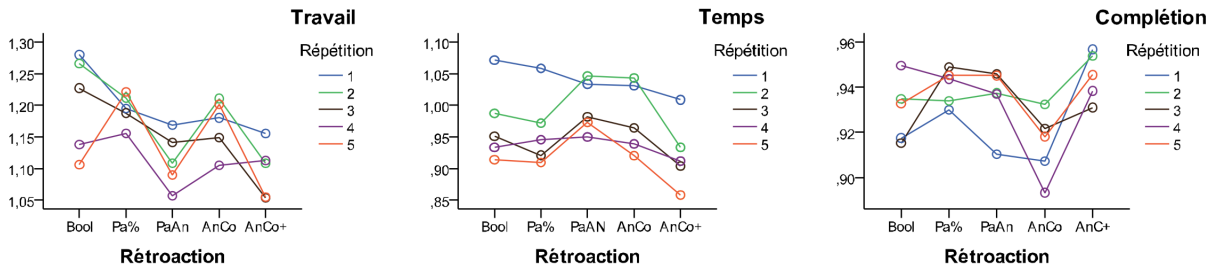


FIGURE 7.13 – Indicateurs de travail, temps et taux de complétion pour chaque répétition d'un geste

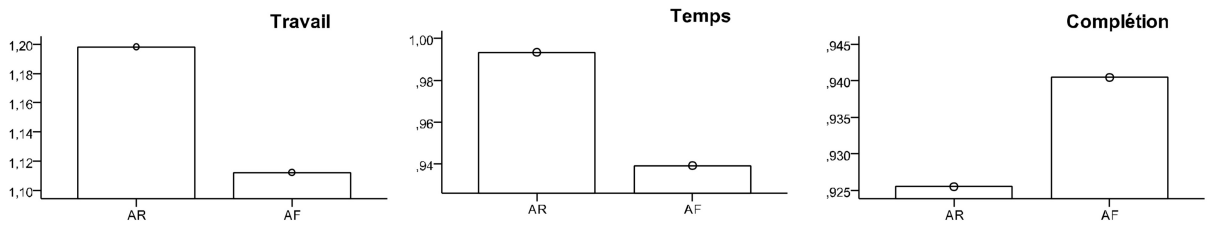


FIGURE 7.14 – Rapports de Travail, Temps et Taux de Completion entre le geste d'interaction et le geste créé en moyenne sur toutes les répétitions.

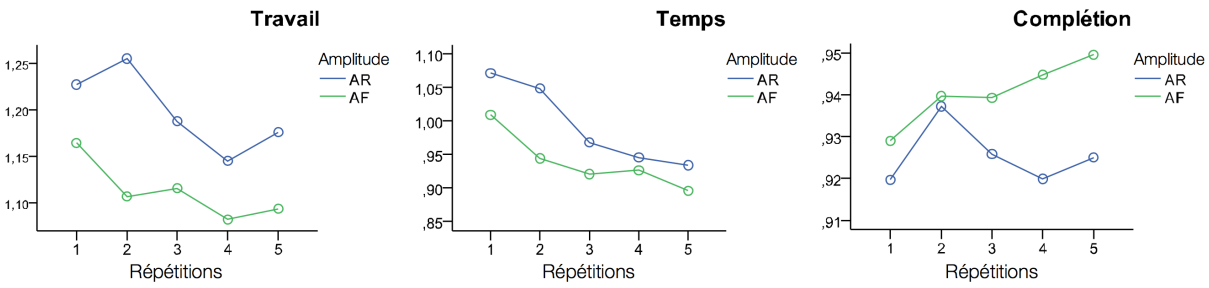


FIGURE 7.15 – Rapports de Travail, Temps et Taux de Completion entre le geste d'interaction et le geste créé, au fur et à mesure des répétitions.

7.4 Discussion

Avant de discuter des résultats de ces deux expériences, je reviens sur la question générale de la comparaison du geste réel et du geste virtuel. On désigne par cette proposition un geste réel tel qu'ouvrir une porte réelle, ou une boîte réelle. Nous avons pris comme base de comparaison dans ces deux expérimentations, le geste crée par l'utilisateur lors de la phase d'apprentissage du système. Ce geste, bien que tout à fait réel, est réalisé au vu d'un objet virtuel, et en particulier sans support physique de l'objet pour guider le geste. Il s'agit donc d'une approximation d'un geste réel que nous utilisons comme point de comparaison.

Affordances Les résultats de la première expérience montrent que les affordances sont le support clair de la stabilité des gestes. En leur absence, les usagers vont jusqu'à les construire eux mêmes en inventant des gestes symbolisant la couleur de l'objet.

Colocalisation Le geste reste identique au geste initial, même en manipulation à distance (non colocalisée) avec un décalage d'1m. Cependant, les sujets tendent naturellement à décaler leur geste vers l'objet.

Rétroactions Bien qu'il soit clair que la rétroaction continue avec le plus fort gain soit la plus confortable et perçue comme la plus réaliste, il n'y a pas de consensus sur une, ou des rétroactions, générant un geste proche du geste initial. Les résultats sur les variations des indicateurs de proximité au geste initial suggèrent un comportement exploratoire de la part de l'utilisateur. Je forme l'hypothèse qu'il consiste en la recherche d'un critère a maximiser dans la rétroaction, et qu'en ce sens l'utilisateur explore le système pour s'y adapter. On peut interpréter comme un comportement exploratoire, la différence entre la répétition 1 et 2 en figure 7.13 pour le temps. La première répétition est un geste d'une durée proche du geste créé, la seconde répétition et les suivantes sont un geste significativement plus rapide. Cette hypothèse de l'exploration par l'utilisateur au fur et à mesure des répétitions peut expliquer l'absence

de consensus sur une rétroaction en particulier. Ce résultat suggère aussi qu'il faut affiner les descripteurs du geste.

Usage d'un support L'usage d'un support réduit l'amplitude du geste, mais les utilisateurs compensent en exagérant les rotations.

D'une façon générale, il semble que, par essais et apprentissages, l'utilisateur s'adapte au système afin de respecter la consigne d'ouvrir un objet. Il peut effectuer un geste plus rapidement quitte à fournir plus de travail que le geste initial pour compléter la tâche d'ouverture au maximum (courbe de travail pour les rétroactions non continues en figure 7.11. En revanche, si l'utilisateur perçoit un retard du système (notamment sur les cas de rétroactions discrètes ou continues avec un gain perçu comme trop faible) il adapte son comportement et l'attend. Dans certains cas de feedback (sans couplage, discrets, retardés), ou à cause d'une non prédictibilité du système d'apprentissage, l'utilisateur va chercher à tester différents gestes (plus ou moins rapides, ou exagérés suivants certaines composantes) afin d'arriver à réaliser la consigne.

En l'absence de rétroactions perçues comme fiables, on peut aussi émettre l'hypothèse d'un modèle *interne* du comportement de l'objet manipulé et de la recherche d'une cohérence entre les gestes réalisés et ce modèle interne.

Chapitre 8

Coopération Homme-Robot

Depuis l'introduction du premier robot industriel au sein d'une usine de General Motors en 1961, l'*Unimate*, et de son évaluation pour la réalisation de soudures sur des pièces automobiles, la robotique industrielle a très largement investi l'usine. Le nombre de robots déployés dans les usines mondiales en 2016 est de l'ordre de 1,8 millions [91]. Nombre de ces robots sont totalement autonomes, et sont employés en remplacement de l'humain pour réduire le danger et la pénibilité du travail ou les conséquences physiques et mentales des tâches répétitives. Ils concernent tant la manipulation d'objets lourds que de la réalisation de petits assemblages fins. Il existe des situations pour lesquelles la compétence humaine est nécessaire, mais pour lesquelles il peut être intéressant qu'un robot réalise une sous-partie de la tâche. En ce sens, la coopération entre l'homme et le robot dans l'usine est une possibilité qui intéresse l'industrie. Cette possibilité pose cependant des questions d'acceptabilité d'ordre social et d'usage. Le travail présenté dans ce chapitre s'intéresse à l'acceptabilité d'usage [1], et à la question de comment l'étudier. L'acceptabilité a diverses facettes, et de nombreuses conditions de coopération peuvent l'influencer : par exemple, la proximité spatiale entre l'homme et le robot, son apparence visuelle, ou les modalités du partage du travail entre eux. Une manière d'étudier les conditions de l'acceptabilité de ce travail commun est de mettre en place des expérimentations physiques mettant en présence des opérateurs et des robots et d'étudier leur retours et avis suivant différents scénarii. Cette méthode est coûteuse, contraignante, peu agile. La réalité virtuelle, du fait de sa versatilité, est une option possible pour explorer la question de l'acceptabilité. Mais quel crédit peut-on accorder aux résultats d'expérimentation en réalité virtuelle de ce type de scénario ?

Ce chapitre décrit des travaux dont l'objet est de comparer l'activité réelle et l'activité en réalité virtuelle dans deux scénarii de travail impliquant un homme et un robot. On aborde d'abord une situation de *co-présence*, l'homme et le robot partageant simplement l'espace de travail, puis une situation de *collaboration* impliquant un échange de pièces entre l'homme et le robot. Les travaux décrits ici ont été réalisés dans le cadre de la thèse de V.Weistroffer [139].

8.1 Co-présence homme-robot

Cette expérience aborde le problème du partage de l'espace par un opérateur et un robot. La distance entre l'homme et le robot influence-t-elle l'acceptabilité pour l'opérateur de travailler avec ce robot ?

1. La question de l'acceptabilité sociale est importante, elle n'est pas abordée ici car elle relève d'autres domaines de spécialité, la sociologie du travail en particulier.

8.1.1 Tâche

La tâche consiste à fixer des éléments sur la face intérieure d'une série de portières de voiture. Ces portes défilent devant l'opérateur, et celui-ci doit y insérer une série de pièces plastiques (Figure 8.1).

Dans l'opération telle que réalisée actuellement sur les lignes de montage, en plus de l'insertion de ces pièces plastiques, l'opérateur doit appliquer une feuille d'étanchéité sur la porte (Figure 8.2) et pour cela faire passer une roulette sur le périmètre de la feuille d'étanchéité pour en assurer l'adhésion. Ce mouvement est contraignant pour le poignet, et confier cette tâche au robot est une solution intéressante pour soulager l'opérateur. La nouvelle configuration, étudiée dans cette expérience, implique que le robot vienne effectuer cette opération de sur la portière (Figure 8.3) à proximité de l'opérateur. L'intersection entre l'espace de travail du robot et de l'opérateur fait que celui-ci peut entrer en contact avec le robot, aussi, un système de détection est installé sur le robot et le fait s'arrêter si la distance avec l'opérateur est inférieure à 15cm.

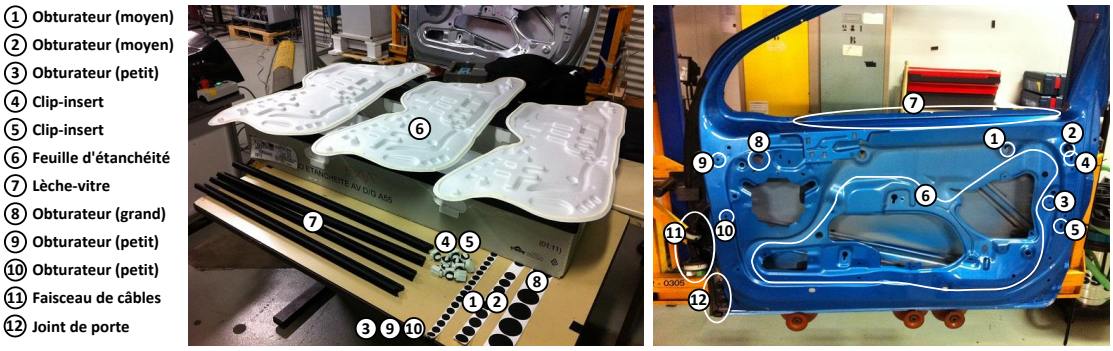


FIGURE 8.1 – L'ordre des opérations à effectuer, les pièces correspondantes et leur emplacement sur la porte. La feuille d'étanchéité porte le numéro 6.

FIGURE 8.2 – Poste Initial, sans robot, l'opérateur doit poser une feuille d'étanchéité, pour en assurer d'adhésion sur la porte, il doit effectuer un mouvement de passage d'une roulette sur un gabarit, contraignant pour le poignet

FIGURE 8.3 – Poste avec robot, c'est le robot qui se charge de la tâche d'adhésion de la feuille d'étanchéité, homme et robot sont amenés à partager l'espace de travail

8.1.2 Implémentation en Réel et Virtuel

Le scénario a été mis en place en situation réelle (notée S_r) de manière à reproduire fidèlement une situation d'usine. L'étude réelle a été réalisée sur une chaîne de montage dédiée aux expérimentations. Celle-ci se situe hors du cycle de production des véhicules pour des raisons de coût. Bien que de plus petite taille que les chaînes de montage en usine elle permet de réaliser des tâches dans des conditions très proches. Des pièces de montage réelles ont été commandées spécifiquement pour l'étude et quatre portes ont été installées sur des balancelles suspendues

sur un rail. L'opérateur pouvait s'approvisionner en pièces sur une table située derrière lui, à côté du robot (voir Figure 8.4). La vitesse des balancelles était la même qu'en usine : environ 0,07 m/s (soit 40 portes par heure).

L'équivalent virtuel de ce scénario (ou Situation Virtuelle notée S_v) a été mis en place dans un système de type CAVE à trois faces, voir Figure 8.5. La capture des mouvement inclut les deux mains, la tête, le bassin. L'affichage est stéréoscopique, à l'échelle 1, et en co-localisation. La simulation a été faite sans système de retour d'effort. La face avant en fait 4 mètres, et est en ce sens bien adaptée au déplacement latéral effectué par l'opérateur lors de cette tâche. Les opérations manuelles étaient réalisées sans retour d'effort, avec un indicateur visuel du succès de la préhension et du montage de chaque pièce. Les petites pièces plastiques se manipulaient à une seule main, au choix de l'opérateur, la feuille d'étanchéité à deux mains. La performance lors de l'opération de de fixation n'étant pas l'objet de l'étude, une aide logicielle [2] simplifiant cette phase a été mise en place.

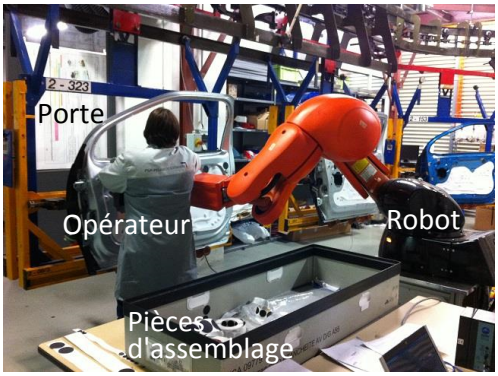


FIGURE 8.4 – Situation de co-présence en réel. S_r

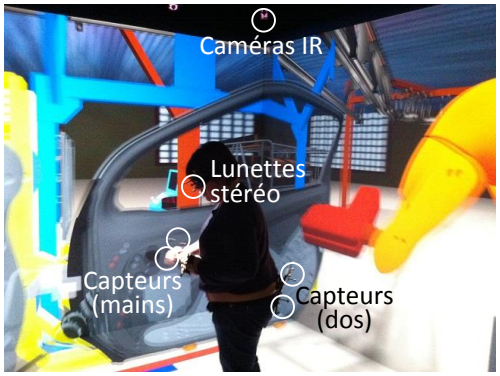


FIGURE 8.5 – Situation de co-présence, simulée dans un CAVE du Groupe PSA, notée S_v.

FIGURE 8.6 – Situation Réelle S_r

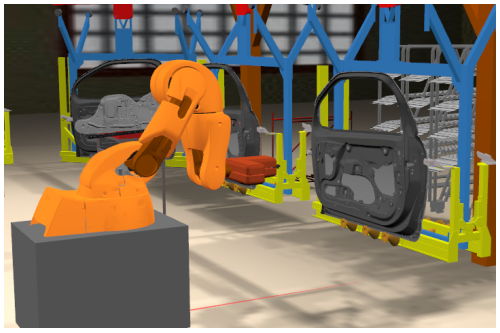


FIGURE 8.7 – Situation Virtuelle S_v

8.1.3 Variables indépendantes : Distance homme-robot, Environnement Réel ou Virtuel

La position de l'espace de travail de l'opérateur et celui du robot, ainsi que la situation de travail (Réel ou Virtuel, notées S_r et S_v) sont l'objet de l'étude. La figure 8.9 montre les deux situations de distances entre les pas de travail du robot et de l'opérateur qui ont été étudiées : *proche*, notée C_p et *éloignée* C_e. La finalité des tests est de recueillir les ressentis des opérateurs quant à l'acceptabilité de ce travail en co-présence avec le robot. Chaque opérateur passe donc sur les 4 combinaisons de ces conditions : S_rC_p, S_rC_e, S_vC_p, S_vC_e.

2. magnétisme virtuel des pièces lorsqu'elles étaient présentées suffisamment près de leur destination

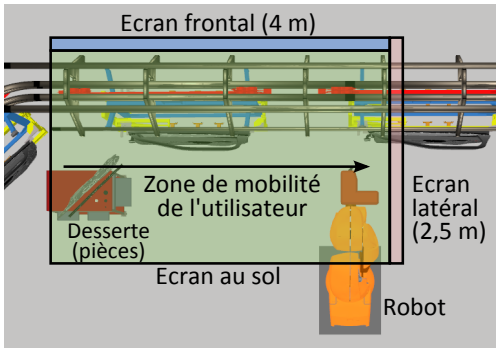


FIGURE 8.8 – Vue de haut de la disposition du robot et de la zone de travail de l'opérateur. Le schéma montre également la disposition des

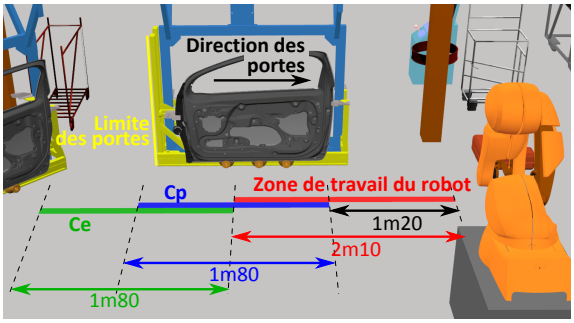


FIGURE 8.9 – Les deux situations de distances entre le pas de travail de l'opérateur et le robot. Proche, notée C_p et éloignée C_e

8.1.4 Mesures : questionnaires et mesures physiologiques

Un passage pour chaque opérateur prenait une journée, une demi journée par situation (réel ou virtuel) dans un ordre tiré aléatoirement. Un questionnaire (Q_c) sur l'utilisabilité, la sécurité, la compétence du robot, l'agréabilité, et l'acceptabilité a été soumis aux opérateurs à la fin de chacune des 4 sessions [3] Un second questionnaire (Q_s) a été soumis à l'issue de chaque conditions de simulation (Réel ou Virtuel) et abordait des questions de familiarisation, utilité, sécurité, efficacité, acceptabilité. Il était posé à l'issue de chaque demi-journée afin d'obtenir des impressions plus générales sur les situations d'expérimentation (S_r, S_v) et de comparer les situations réelle et virtuelle.

Thèmes	Questions	Réponses							
Utilisabilité	Vous avez eu l'impression de contrôler le travail avec le robot	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot s'est adapté à votre travail	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous avez dû vous adapter au robot*	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot vous a contraint dans votre travail*	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Sécurité	En présence du robot, vous vous sentiez	En insécurité	1	2	3	4	5	6	En sécurité
	En présence du robot, vous vous sentiez	Anxieux	1	2	3	4	5	6	Décontracté
	La distance de sécurité avec le robot était adaptée	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	La vitesse du robot était adaptée et sécurisante	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Compétence du robot	Le robot vous a semblé plutôt	Incompétent	1	2	3	4	5	6	Compétent
	Le robot vous a semblé plutôt	Inefficace	1	2	3	4	5	6	Efficace
	Le robot vous a semblé plutôt	Inutile	1	2	3	4	5	6	Utile
Impression	L'interaction avec le robot vous a semblé	Désagréable	1	2	3	4	5	6	Agréable
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui

*échelle inversée

TABLE 8.1 – Le questionnaire Q_c sur la coprésence

Le rythme cardiaque et la conductance de la peau ont été recueillis à chaque fois que les opérateurs étaient au repos (au début de chaque condition). L'analyse de ces données est une question ouverte, en particulier leur interprétation relativement à des états affectifs. Nous avons choisi de ne pas interpréter ces données à un niveau plus haut, mais de simplement retenir les valeurs moyennées et normalisées par sujet, sur une fenêtre de quelques dizaines secondes.

3. Les quatre sessions correspondent aux combinaisons (réel, virtuel)× (proche éloigné) : S_rC_p, S_rC_e, S_vC_p, S_vC_e

Thèmes	Questions	Réponses							
Familiarisation	Vous avez eu suffisamment de temps pour vous familiariser avec les opérations	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous étiez à l'aise avec les opérations à effectuer	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Utilité	Le robot est un gain pour mieux réussir votre travail	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot est un gain pour la santé	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Dans l'avenir, un système similaire vous semblerait utile dans votre travail	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Sécurité	Vous vous êtes senti en sécurité	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	L'aspect du robot était sécurisant	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Efficacité	Vous avez trouvé que la collaboration avec le robot était efficace	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous en tant qu'opérateur vous êtes senti aussi efficace que vous l'auriez voulu	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot était efficace	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui

TABLE 8.2 – Le questionnaire Q_s posé à l'issue de chaque demi-journée afin d'obtenir des impressions plus générales sur les situations d'expérimentation (S_r, S_v) et de comparer les situations réelle et virtuelle

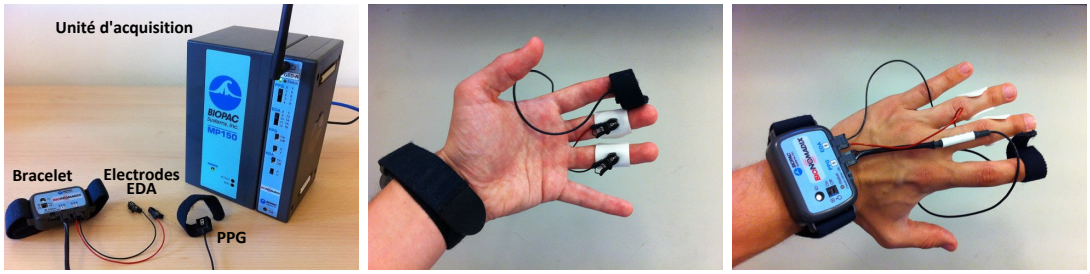


FIGURE 8.10 – Le système Biopac (BioNomadix PPGED) utilisé pour acquérir le rythme cardiaque et la conductance de la peau, et le placement sur la main d'un utilisateur

8.1.5 Résultats

Questionnaires

Les résultats sur l'utilisabilité, la sécurité et l'acceptabilité (Questionnaire Q_c, Figure 8.11) montrent deux aspects importants. D'une part, la configuration proche du robot (C_p) a toujours été perçue moins utilisable, moins sécurisée et moins acceptable que la configuration éloignée (C_e). D'autre part, cette différence entre configurations a été observée à la fois en situation réelle et en situation virtuelle : des différences significatives ont été décelées entre les deux configurations dans chaque situation (excepté pour la sécurité en situation réelle). Ceci montre que les opérateurs étaient sensibles aux différences entre configurations, que ce soit en situation réelle ou virtuelle. Enfin, on peut noter que les résultats en situation virtuelle sont légèrement plus hauts que ceux en situation réelle (surtout pour l'utilisabilité et l'acceptabilité) : la situation virtuelle a souvent été perçue comme plus simple et moins contraignante à réaliser.

Les résultats du questionnaire Q_s sont représentés sur la Figure 8.12 et regroupés par thèmes (moyennes des questions correspondantes). Aucune différence significative n'a été décelée entre S_r et S_v. Ceci montre que la situation d'expérimentation (réelle ou virtuelle) n'a pas eu d'influence sur les impressions des opérateurs.

Mesures Physiologiques

La figure 8.13 représente les moyennes normalisées et moyennées sur tous les opérateurs et toutes les répétitions de chaque condition. On observe des résultats identiques entre réel et virtuel sur le rythme cardiaque : on note que dans la situation réelle, le rythme cardiaque est stable entre les deux configurations proche et éloignée. On retrouve cette stabilité du rythme cardiaque dans la situation virtuelle. On observe une différence entre réel et virtuel sur la conductance de

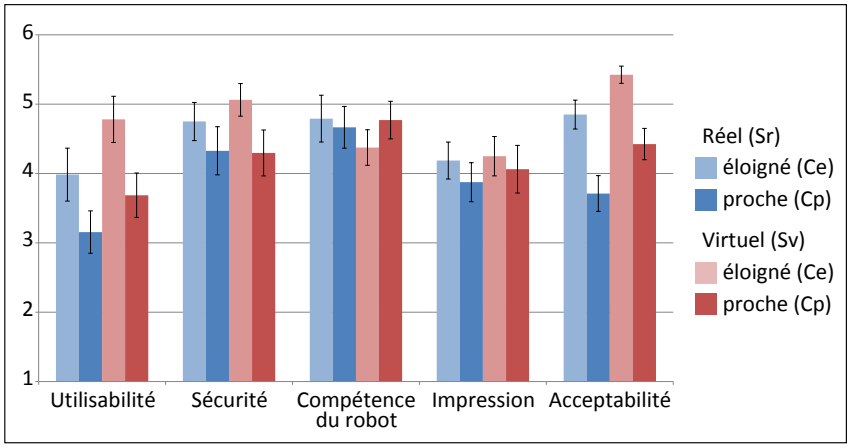


FIGURE 8.11 – Les résultats du questionnaire Q_c sur la coprésence regroupés par thèmes

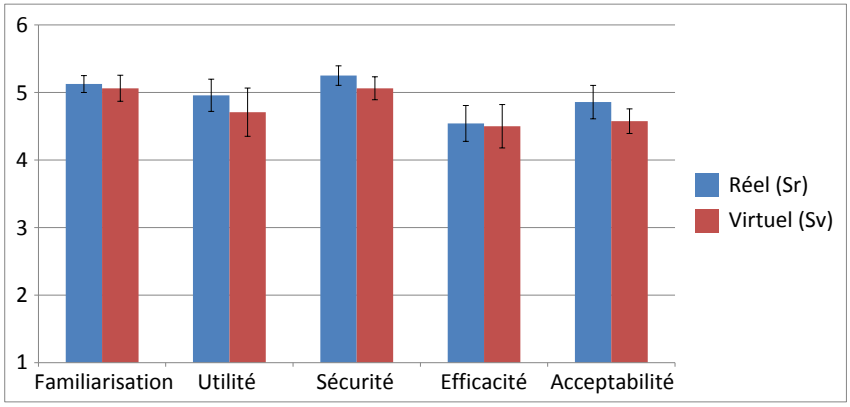


FIGURE 8.12 – Les résultats du questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation regroupés par thèmes

la peau : la conductance augmente pour la situation proche en réel, on ne retrouve pas cette tendance dans le cas virtuel.

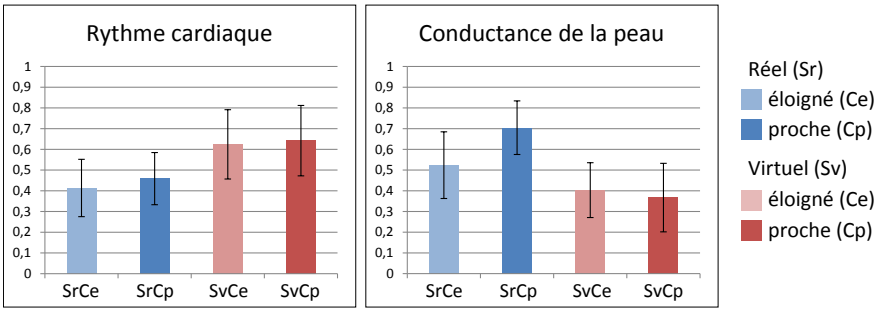


FIGURE 8.13 – Les résultats des mesures physiologiques

8.2 Coopération homme-robot

La première expérience a considéré la distribution *spatiale*, la seconde va se pencher sur la question de la distribution *temporelle*. Il semble naturel d'aborder l'étude de l'acceptabilité de la coopération homme-robot par l'influence de leur proximité spatiale. Nous avons vu dans l'expérience précédente, que la configuration spatiale a bien un effet, et que l'outil réalité virtuelle, suivant les indicateurs de l'activité ou du comportement considérés, présente des

cohérences ou des divergences avec la réalité. D'autres caractéristiques de la collaboration sont susceptibles d'influencer l'acceptabilité de la coopération homme-robot, en particulier les modalités du partage du travail temporel entre eux. On s'intéresse dans cette seconde expérience à une situation de collaboration où une pièce doit être présentée à l'opérateur par le robot. Dans ce cadre, deux aspects de la collaboration nous intéressent. Le premier est le niveau d'*interaction* physique entre l'homme et le robot, tiennent-ils la pièce en même temps ou non ? Le second est le niveau d'autonomie du robot : le passage de la pièce est-il dépendant de l'humain ou est-ce le robot qui décide de l'instant ou fournir la pièce ? L'expérience présentée dans cette section explore la capacité de la réalité virtuelle à générer une réponse réaliste pour ces nouvelles situations.

8.2.1 Tâche

La tâche considérée consiste à monter une pièce composée de différents sous-éléments. Cet ensemble de sous éléments est un *kit* de pièces et donne son nom à la tâche dans le jargon industriel : le *kitting*. La situation aujourd'hui est qu'un opérateur humain récupère les différentes pièces dans des boîtes de rangement puis réalise le montage. La récupération des pièces et les aller-retours entre les rangements et la table sont potentiellement pénibles, et l'introduction d'un robot dans cette situation pourrait soulager l'opérateur. Le robot se chargerait de récupérer les pièces dans les rangements, et les fournirait à l'opérateur selon des modalités à définir. Ce sont ces modalités qui sont à l'étude dans cette expérimentation. Cette tâche, avec un robot d'assistance, est présentée en Figure 8.14. L'opérateur et le robot se font face, et sont séparés par une table sur laquelle le montage et l'échange de pièces se fait.

FIGURE 8.14 – Vue de haut et de côté d'une tâche de *Kitting* assistée par un robot. Le robot fournit une série de pièces à l'opérateur, pendant que celui-ci se charge de monter l'ensemble. La façon dont ce fait cet échange, ainsi que le niveau d'autonomie du robot dans la décision du moment où passer les pièces à l'opérateur est l'objet de cette étude.

8.2.2 Implémentation en réel et virtuel

La tâche a été mise en place dans un environnement réel et un environnement virtuel S_r et S_v, voir Figure 8.15. Le système utilisé est un CAVE 5 faces, avec une capture des mouvements les deux mains et de la tête. L'affichage est stéréoscopique, à l'échelle 1, et en co-localisation. La simulation a été faite sans système de retour d'effort. Comme dans la première expérience, la saisie se fait par proximité de la main aux objets, les gestes de préhension ne sont donc pas nécessaires à la réalisation de la tâche. Cependant, pour le montage des pièces entre elles, le geste doit être précis, il faut en particulier s'assurer de l'alignement des pièces entre elles.

FIGURE 8.15 – La cellule expérimentale de collaboration homme-robot en situation réelle et en situation virtuelle

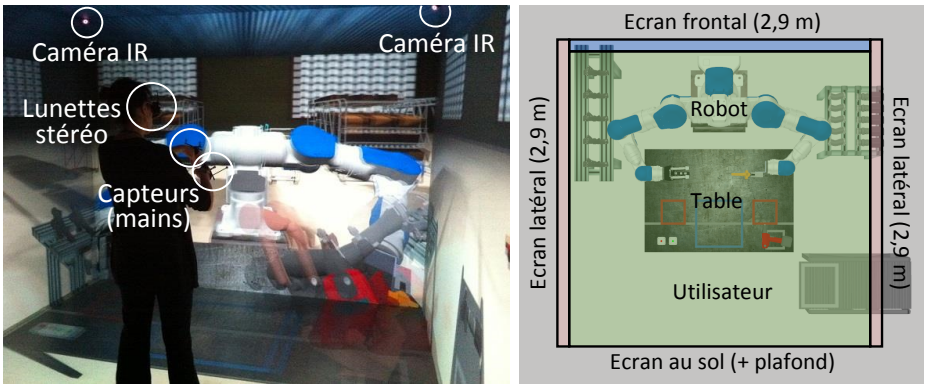


FIGURE 8.16 – Un utilisateur dans le CAVE de PSA Peugeot Citroën et la configuration du CAVE relativement aux éléments de la scène vue de haut. La capture des mouvement inclut les deux mains, 6dof par main, sans tracking des doigts afin de réaliser la tâche, et la tête. L'affichage est stéréoscopique, à l'échelle 1, et en co-localisation. La simulation a été faite sans système de retour d'effort.

8.2.3 Variables Indépendantes

Niveaux d'*interaction* entre l'homme et le robot

Trois niveaux d'interaction avec le robot ont été mis en place, ils réalisent des distributions temporelles différentes de collaboration entre l'opérateur et le robot. Ils correspondent à des niveaux croissants d'interaction (faible, moyen, fort, notés S_1, S_2, et S_3). Dans le premier scénario S_1, le robot dépose simplement les pièces dans des zones indiquées sur la table et l'opérateur les récupère une fois déposées. Il s'agit d'un scénario d'interaction faible entre l'opérateur et le robot : il n'y a aucun contact avec le robot et les tâches s'effectuent de manière asynchrone (dépôt de pièce par le robot, puis prise par l'opérateur). Dans le deuxième scénario S_2, le robot tend les pièces à l'opérateur au-dessus des zones de dépôt : l'opérateur doit les récupérer directement au niveau des pinces du robot. Il s'agit d'un scénario d'interaction de niveau intermédiaire : l'opération de passage de la pièce est synchrone, il y a contact entre l'homme et le robot via la pièce de montage. Enfin, le troisième scénario S_3 fait intervenir une interaction plus forte avec le robot : celui-ci maintient une pièce face à l'opérateur, qui doit assembler deux pièces directement sur la pièce maintenue par la pince du robot. Le robot oriente également la pièce de manière à faciliter les opérations (emmanchage, vissage). Une fois la pièce terminée, le robot libère la pièce et l'opérateur la dépose de son côté. Dans ce troisième scénario, les opérations s'effectuent de manière synchrone et assistée : le robot et l'opérateur travaillent en même temps et le robot réalise des mouvements qui facilitent la tâche à l'opérateur.

Niveaux d'autonomie du robot

L'autonomie du robot influence-t-elle l'acceptabilité ? Dans ce scénario, la question de l'autonomie du robot peut prendre cette forme : une fois qu'une pièce est fixée, qui décide de démarrer l'action de passer la pièce suivante ? L'opérateur ou le robot ? Deux modes de contrôle du robot ont été implémentés : non autonome C_1, autonome C_2. Dans le cas C_1, c'est l'opérateur qui, par l'appui sur un bouton, déclenche l'action suivante du robot. Dans le cas C_2, l'opérateur est face à un robot qui effectue automatiquement l'action suivante dès la réalisation par l'opérateur d'une étape dans le montage. Pour des questions de simplicité d'implémentation, cette seconde fonctionnalité a été assurée par un *wizard of oz*, en l'occurrence un expérimentateur non visible de l'opérateur, et qui déclenchait l'action suivante du robot au moment jugé opportun. Ceci donnait l'illusion à l'opérateur que le robot était autonome dans cette prise de décision. Chaque opérateur est donc exposé à 12 conditions expérimentales :
$\{S_1, S_2, S_3\} \times \{C_1, C_2\} \times \{S_r, S_v\}$.

8.2.4 Mesures

Les données recueillies sont issues de la participation de 9 personnes à l'expérience. 6 d'entre elles ayant le statut de moniteur [4]. Un premier questionnaire Q_c (Tableau 8.3) était posé à l'issue de chaque scénario d'interaction S_1, S_2, S_3. Un deuxième questionnaire Q_s (Tableau 8.4) était posé à l'issue de chaque demi-journée pour recueillr de façon plus globale les impressions des utilisateurs vis-à-vis de la situation réelle et de la situation virtuelle, celles-ci étaient distribuées aléatoirement entre le matin et l'après midi.

Des mesures physiologiques (rythme cardiaque, conductance de la peau) utilisant le même dispositif que dans la première expérience ont été effectuées. Elles ont été réalisées juste après chaque condition expérimentale. Elles sont moyennées sur une durée d'une minute, et normalisées pour chaque opérateur par rapport à une mesure initiale au repos.

Thèmes	Questions	Réponses			Manuel	Automatique
Interaction	Le niveau d'interaction avec le robot vous a semblé	Faible	1 2 3 4 5 6	Fort		
Utilisabilité	Vous avez eu l'impression de contrôler le travail avec le robot	Non	1 2 3 4 5 6	Oui		
	Le travail avec le robot vous a imposé des contraintes supplémentaires*	Non	1 2 3 4 5 6	Oui		
	La cadence du robot vous a rendu	Anxieux	1 2 3 4 5 6	Décontracté		
Sécurité	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	En insécurité	1 2 3 4 5 6	En sécurité		
	L'interaction directe avec le robot vous a rendu	Anxieux	1 2 3 4 5 6	Décontracté		
Utilité	Au cours de l'interaction, le robot vous a semblé	Inutile	1 2 3 4 5 6	Utile		
	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	Inutile	1 2 3 4 5 6	Utile		
Efficacité	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	Inefficace	1 2 3 4 5 6	Efficace		
	Au cours de l'interaction, le robot vous a semblé	Inefficace	1 2 3 4 5 6	Efficace		
Acceptabilité	L'interaction avec le robot vous a semblé	Perturbante	1 2 3 4 5 6	Satisfaisante		
	La collaboration avec le robot vous a semblé acceptable	Non	1 2 3 4 5 6	Oui		

*échelle inversée

TABLE 8.3 – Le questionnaire Q_c soumis à l'issue de chaque scénario de collaboration S_1, S_2 et S_3

8.2.5 Résultats

Questionnaires

Le résultat important est la cohérence des résultats des questionnaires réalisés en réel et ceux réalisés en virtuel. Aucune difference significative [5] n'a été observée sur les questionnaires entre

4. opérateur expérimenté, à même de remplacer n'importe quel autre opérateur sur différents postes.
5. Tests de Wilcoxon

Thèmes	Questions	Réponses							
Familiarisation	Vous avez eu sufisamment de temps pour vous familariser avec les opérations	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous étiez à l'aise avec les opérations à effectuer	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Sécurité	L'apparence du robot vous a paru sécurisante	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	L'interaction avec le robot était à une distance adaptée	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	La vitesse du robot était adaptée	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous vous êtes senti en sécurité	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui

TABLE 8.4 – Le questionnaire Q_s soumis après chaque situation d'expérimentation : en Réel ou en Virtuel

réel et virtuel. On retrouve en effet les mêmes tendances : une influence claire du niveau d'autonomie du robot (C_1, C_2), et peu de différence entre les niveaux d'interaction (S_1, S_2, S_3). Les reponses en virtuel et réel se rejoignent sur les tendances majeures : Le contrôle autonome par le robot (C_2) est clairement préféré à la version manuelle (C_1) en ce qui concerne l'acceptabilité. Ensuite, l'utilité, l'utilisabilité, l'acceptabilité et la sécurité sont perçues comme égales pour les trois conditions d'interaction (S_1, S_2, S_3). Quelques différences faibles (non significatives) apparaissent entre virtuel et réel : la sécurité perçue est plus grande en virtuel qu'en réel, et les opérateurs se sont sentis moins à l'aise pour effectuer les opérations en virtuel.

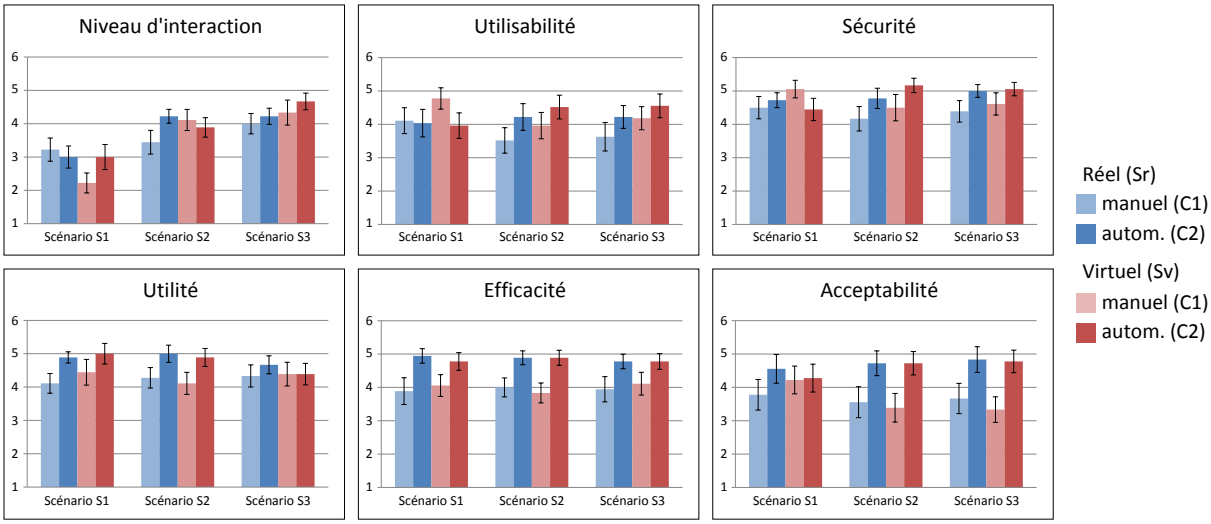


FIGURE 8.17 – Les résultats du questionnaire Q_c sur les scénarios de collaboration, regroupés par thèmes

Mesures Physiologiques

Le rythme cardiaque des opérateurs a diminué de manière significative avec l'assistance proposée par le robot : ceci montre une baisse des effort fournis par les opérateurs. Ensuite, la conductance de la peau des opérateurs a augmenté avec l'interaction avec le robot : les opérateurs semblaient avoir plus d'appréhension à interagir avec le robot, ce qui ne les a pas empêchés de collaborer efficacement. Enfin, les mêmes tendances ont été observées en situation réelle et en situation virtuelle, seulement pour le rythme cardiaque : les opérations virtuelles étaient bien soulagées par l'assistance du robot, mais les opérateurs semblent avoir moins d'appréhension vis-à-vis de l'interaction avec un robot virtuel. Même si ce dernier résultat est à discuter notamment sur le lien entre sudation et appréhension, il est appuyé par les questionnaires sur la sécurité perçue, qui augmente légèrement en virtuel.

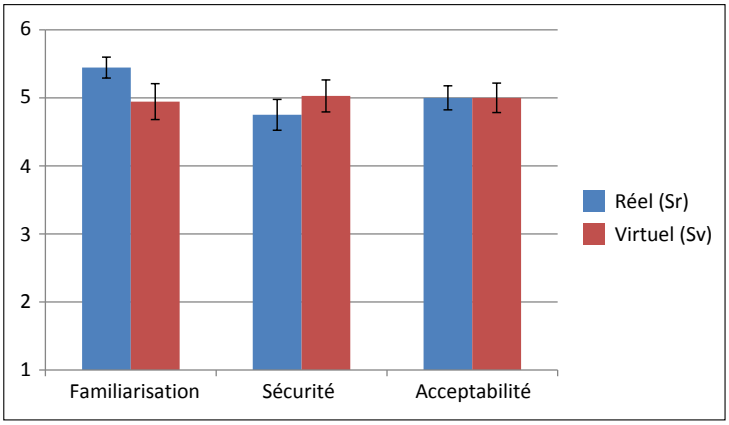


FIGURE 8.18 – Les résultats du questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation regroupés par thèmes

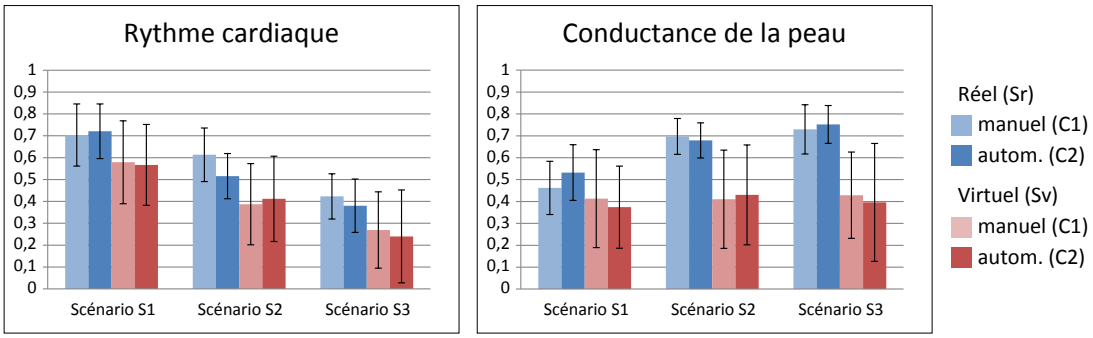


FIGURE 8.19 – Les résultats des données de mesures physiologiques

8.3 Synthèse

En synthèse de ces deux expérimentations, il ressort que la réalité virtuelle génère des réponses réalistes en ce qui concerne les questionnaires. Dans le cas d'étude de co-présence, la préférence des opérateurs d'un robot plus éloigné apparaît dans les deux environnements. Pour la collaboration, le souhait d'un robot plus autonome ressort également tant en réalité virtuelle qu'en réel. Cependant certains indicateurs dans ces questionnaires semblent traduire des différences entre réel et virtuel, même si elles ne sont pas significatives. Pour le cas d'usage en coopération (seconde expérience) la *sécurité perçue* est supérieure en virtuel. Tout se passe comme si le robot virtuel suscitait moins d'appréhension. On peut le concevoir au vu de ce qui manque du point de vue sensoriel. La combinaison d'indices sensoriels pouvant former une sentation d'inconfort ou d'insécurité près d'un robot industriel sont bien moindres en virtuel : l'immatérialité physique du robot virtuel suggère que le contact ne peut avoir lieu, il ne produit pas de son, ne dégage pas d'odeur d'huile, ne déplace pas de masses d'air lors de ses mouvements. Pour le cas d'usage en co-présence, l'utilisabilité et l'acceptabilité, même si elles suivent les mêmes variations suivant les conditions, sont supérieures en valeur absolue en virtuel comparativement à la même situation en réel. Il semble plus facile d'accepter et d'interagir avec ce robot virtuel. Ces résultats suggèrent que les limitations de l'immersion sensori-motrice peuvent influencer les valeurs absolues des résultats. Dans les cas étudiés ici, ces limitations n'ont pas induit de différences significatives, et ont malgré tout mené à des réponses réalistes aux questionnaires dans le cas virtuel.

En ce qui concerne les mesures physiologiques, le rythme cardiaque en virtuel semble suivre les tendances du réel : pas de variation lorsque l'on rapproche le robot (expérience de co-présence), prédiction des variations de baisse d'effort en fonction de l'assistance (expérience

de coopération). La mesure de sudation elle n'est pas représentative en virtuel des variations observées en réel. En effet lorsque le robot réel est proche de l'opérateur (expérience de co-présence) on observe une augmentation de la sudation, que l'on ne retrouve pas dans le cas virtuel. Dans l'expérience de coopération, la sudation augmente avec le niveau d'interaction, phénomène que l'on ne retrouve pas en virtuel. De plus, les mesures physiologiques sont sujettes à précautions, pour des raisons pratiques : elles sont matériellement difficiles, en particulier car les mouvements du sujet modfient le contact peau/capteur et rendent les mesures très variables. Pour contrer ceci, les mesures sont faites au repos, et donc éloignées temporellement des causes de la sudation. La relation entre sudation et appréhension sont à discuter, et à explorer en utilisant des méthodes plus précises d'évaluation.

Chapitre 9

Synthèse et Perspectives

Positionnement de mes travaux

La réponse réaliste en réalité virtuelle n'est pas à considérer comme un fait acquis. Les travaux existants, ainsi que ceux que je présente dans ce document montrent qu'il peut y avoir une réponse réaliste sur certains aspects de l'activité humaine, et suivant le niveau d'analyse que l'on adopte.

Le besoin d'un guide le lecture pour présenter les travaux existants employant la méthode comparative réel-virtuel m'a amené au chapitre 4 à choisir un formalisme de description de l'activité. J'ai emprunté un formalisme issu du monde du travail [44], celui-ci décrit un poste en listant les aptitudes mobilisées. Je l'utilise au niveau le plus sommaire, en considérant 4 classes d'aptitudes : perceptive, psychomotrice, cognitive et interpersonnelle. Ensuite, la synthèse des travaux existants utilisant l'approche comparative, a fait ressortir différents niveaux d'analyse de la réponse réaliste. J'ai distingué : la *comparaison absolue* entre réel et virtuel sur des critères quantifiables, la comparaison des relations d'*ordre* de critères de l'activité entre réel et virtuel, l'analyse de la *nature des informations* prises en compte par l'usager dans l'environnement qu'il soit virtuel ou réel, l'observation de l'*état mental* de l'utilisateur, et enfin l'analyse des *mécanismes* sous-jacents. A partir de ces deux échelles de *description de l'activité*, et de *niveau d'analyse* de la réponse réaliste, je propose de construire une grille de présentation des recherches sur la réponse réaliste (figure 9.1). Dans les paragraphes suivants je mets en avant l'apport principal des quatre cas que j'ai développé dans mes recherches, et les situe dans ce tableau.

9.1 Synthèse des Résultats

Observation de matériaux L'observation de matériaux physiquement réalistes en réalité virtuelle est un champ en forte demande, la visualisation de matériaux physiquement réalistes (mode, luxe, automobile, architecture) dans un environnement virtuel, dont l'apparence est prédictive de l'apparence du matériau futur serait un outil très utile. Le travail présenté au chapitre 5 a permis de montrer que des métriques de l'apparence d'un matériaux complexe sont perceptivement cohérentes entre réel et virtuel. En d'autres termes, l'égalisation perceptive d'un échantillon du matériau considéré donne lieu à des descripteurs du matériau très proches entre réel et virtuel. Ce résultat d'une réponse réaliste lors de la visualisation de ce matériau valide l'usage prédictif de la simulation. L'expérience montre que la stéréoscopie améliore ces résultats (rapproche la métrique virtuelle de la métrique réelle pour une égalisation perceptive du matériau). L'usage de la perspective dynamique nécessite la parallélisation du rendu, et

	Absolu	Ordre	Informations	Etat mental	Mécanismes
Perceptif	Matériaux (ch.5) Formes (ch.6)				
Psychomoteur	Formes (ch.6)				
Cognitif	Geste (ch.7)				
Interpersonnel	Collaboration Homme-Robot (ch.8)				

FIGURE 9.1 – Je propose une grille de lecture des travaux sur la réponse réaliste, celle-ci s'appuie sur une proposition de différents niveaux d'analyse de la réponse réaliste (comparaison absolue, ordonnancement des conditions, nature des informations prises en compte, état mental, mécanismes cognitifs), et l'usage d'une classification des aptitudes principales mobilisées lors de l'activité.

est une étape de recherche suivante. La route vers un outil prédictif de rendu de matériaux en réalité virtuelle passe par l'intégration d'autres modèles physiques, pour d'autres types de matériaux, et par la qualification du niveau de réponse réaliste pour chacun. Cette contribution se place au niveau de l'aptitude *perceptive*, et éventuellement *psychomotrice* si l'observateur est mobile, et le niveau d'analyse est absolu, car les métriques sont comparées directement entre une photographie d'un échantillon réel et un échantillon virtuel.

Perception des Formes Il est important de visualiser correctement les formes et tailles des objets en virtuel. Les travaux décrits au chapitre 6 ont permis de mettre en évidence la fragilité de la réponse réaliste en ce qui concerne la perception de la taille d'un objet perçu dans un système de type CAVE, on y découvre qu'il peut y avoir égalité, sous-estimation, ou sur-estimation perceptives suivant la position relative entre l'objet virtuel et l'écran de projection. Ce chapitre ouvre la discussion sur les modèles projectifs utilisés pour générer les images stéréoscopiques. Cette contribution se place dans dans le tableau 9.1 comme une comparaison *absolue*, car on compare directement la caractéristique de taille, pour une activité que je classerai comme *perceptive*, et *psychomotrice* du fait de l'usage du mouvement physique pour profiter de la parallaxe de mouvement.

Geste de Manipulation En déconstruisant les conditions d'immersion, les travaux exposés au chapitre 7 cherchent à étudier si et comment le geste est modifié par rapport à un geste initial. On y montre que les affordances sont le support clair de la stabilité du geste, que la manipulation à distance ne dégrade pas le geste. Ensuite, on constate que l'usage d'un support pour réduire la fatigue (coude posé) réduit l'amplitude du geste en translation, et que les sujets compensent sur d'autres degrés de liberté. En effet, les sujets perçoivent que le système permet ce type de stratégie pour compléter la tâche en cours. Enfin, suivant le type de rétroaction, ce sont différentes caractéristiques (temps, travail) du geste que les sujets cherchent à égaliser comparativement au geste initial. L'expérience suggère des comportements d'adaptation qui restent à démontrer formellement. On peut formuler différentes hypothèses pour des expériences futures : en l'absence de variable à minimiser ou maximiser (rétroaction limitée) les sujets

explorent le comportement du système en y cherchant des invariants, voire en les inventant (création de mnémoniques), ou encore utilisent des modèles internes, innés, du mouvement pour caler le virtuel sur un réel supposé. Les expérimentations comparent les métriques du mouvement (absolu), pour une activité dont le classement de l'aptitude principale, entre psychomoteur et cognitif, est mouvante, en tout cas à discuter.

Coopération Homme-Robot Enfin, la dernière contribution s'intéresse à l'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et évalue l'outil réalité virtuelle pour l'explorer. On démontre que pour deux situations différentes (coprésence et collaboration), la réalité virtuelle est un outil viable pour la réponse aux questionnaires d'acceptabilité. La réponse electrodermale ne suit pas les même variations en virtuel, le rythme cardiaque suit les même tendances. Le lien entre les mesures physiologiques et un état émotionnel reste une question très ouverte. Je place cette contribution à l'intersection de l'*interpersonnel*, et des niveaux d'analyse *absolus*. Je place ces travaux dans l'analyse d'*ordre* car la mise en place de toutes les conditions expérimentales tant en réel qu'en virtuel permet de comparer leur ordonnancement.

9.2 Perspectives

Sous leur forme chiffrée et comparative, par l'analyse que j'ai qualifiée d'*absolue*, ces résultats apportent une réponse concrète à la question de la réponse réaliste pour des cas d'usage spécifiques. Ils permettent de délimiter le domaine de validité de la réalité virtuelle, pour des scénarii d'usage appliqués. En effet, les recherches étaient menées dans le contexte de l'application, ici, industrielle, thérapeutique ou artistique, de la réalité virtuelle. Cette connaissance des limites de la réponse réaliste est fondamentale. Elle permet premièrement de choisir d'utiliser la réalité virtuelle ou non. Deuxièmement elle permet de développer des scénarii d'usage qui se trouvent dans le domaine de la réponse réaliste.

La question qui se pose ensuite est celle de l'*extrapolation* de ces résultats pour d'autres cas d'usage. Ils sont spécifiques, et leur extrapolation à des situations différentes, est une question ouverte. Par exemple, l'égalisation des métriques constatée lors de la visualisation du matériau à effets est-elle robuste au changement du contexte de visualisation ? Si l'on déploie le matériau modélisé sur un véhicule complet à l'échelle 1 ou si la couleur du matériau change peut-on appliquer ces mêmes résultats ? Les tendances sur l'estimation de tailles d'objets changent-elles suivant l'échelle d'observation ou l'ambiance lumineuse ? S'obliger à parcourir tous les cas possibles n'est pas compatible avec l'usage de la réalité virtuelle comme outil prédictif, puisque son intérêt est justement de s'éviter, du moins en partie, des expérimentations en réel. L'usage de la réalité virtuelle pour d'autres cas que ceux validés reste donc en partie un pari. Les résultats de l'approche comparative sont un *indicateur* à prendre en compte lors de la conception d'un EV pour un nouvel usage.

Pour gagner en généricité des résultats des études sur la réponse réaliste, une piste intéressante est celle des les niveaux supplémentaires de l'analyse, en particulier ceux de l'information et des processus cognitifs. Cette connaissance aurait deux utilités : évidemment, qualifier la nature réaliste des réponses au niveau des processus engendrés en virtuel, mais aussi participer à la base de connaissances nécessaires à la *conception* d'environnements virtuels. Savoir quelles informations sont prises en compte dans le virtuel, et si elles sont égales ou remplacées par d'autres en virtuel, est une information précieuse pour dimensionner l'immersion d'un EV en cours de conception.

Dans mes travaux, démontrer que les mécanismes cognitifs sous-jacents sont les mêmes en réel et virtuel, sort de mon domaine de recherche et en ce sens je ne propose pas de contributions

dans la colonne *mécanismes cognitifs* de la grille de lecture. Pour développer ces connaissances, le rapprochement des communautés de réalité virtuelle et de sciences cognitives est souhaitable. L'idée est de mener en parallèle des recherches sur les résulats absolus *et* les mécanismes sous-jacents. Dans la synthèse de mes travaux, je propose une formalisation possible de l'étude de la réponse réaliste, son objet est de proposer la notion de cadre pour classer les études scientifiques. Une formalisation de ce type appelle à être étendue selon des classifications plus fines de l'activité (par exemple avec le niveau plus détaillé de la classification de Fleischman voir annexe 9.3), et complétée avec des résultats à tous les niveaux : qu'ils soient chiffrés, ou considérant les mécanismes cognitifs sous-jacents.

Un outil rêvé pour tout concepteur d'environnement virtuel cherchant la réponse réaliste prendrait la forme d'un dictionnaire, organisé selon une classification comme celle proposée ici, affinée selon des tâches canoniques, donnant pour chaque activité un niveau d'immersion nécessaire pour obtenir une réponse réaliste. Ces activités canoniques, seraient les briques de base que le concepteur d'EV composerait pour décrire une activité plus complexe, et en ce sens, cette base de données organisée permettrait de composer l'immersion en EV pour toute activité complexe. Cet outil est purement conceptuel : une activité peut-elle être toujours décomposée en sous tâches ? Plus importante, la question suivante conditionne l'existence de cet outil imaginé : pourrions nous combiner l'immersion nécessaire à ces tâches canoniques de façon simplement additive ? Ou faut-il tenir compte des interactions entre les aptitudes mises en jeu ? Les approches enactives ont ici un rôle potentiel. Même si cet outil idéal que je décris ne voit pas le jour du fait de la diversité des modes d'action, des modes de résolution de problèmes par l'humain, des différences culturelles, sa considération conceptuelle pose des questions qui montrent à mon sens que le dialogue entre réalité virtuelle et les sciences cognitives est non seulement pertinent mais indispensable.

Bibliographie

[1] Johnny Accot and Shumin Zhai. Beyond Fitts' Law : Models for Trajectory-based HCI Tasks. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, pages 295–302, New York, NY, USA, 1997. ACM.

[2] Hayward P. Andres. A comparison of face-to-face and virtual software development teams. *Team Performance Management*, 8(1/2) :39–48, 2002.

[3] Paul Arnold, Martin J. Farrell, Steve Pettifer, and Adrian J. West. Performance of a skilled motor task in virtual and real environments. *Ergonomics*, 45(5) :348–361, April 2002.

[4] A. S. Axelsson, A. Abelin, I. Heldal, R. Schroeder, and J. Wideström. Cubes in the cube : a comparison of a puzzle-solving task in a virtual and a real environment. *Cyberpsychology & Behavior : The Impact of the Internet, Multimedia and Virtual Reality on Behavior and Society*, 4(2) :279–286, April 2001.

[5] Hooman Baradaran and Wolfgang Stuerzlinger. A Comparison of Real and Virtual 3d Construction Tools with Novice Users. *CGVR*, 6 :10–15, 2006.

[6] Woodrow Barfield, Claudia Hendrix, and Karl-Erik Bystrom. Effects of Stereopsis and Head Tracking on Performance Using Desktop Virtual Environment Displays. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 8(2) :237–240, April 1999.

[7] Jochen Baumeister, Kirsten Reinecke, Marjolijn Cordes, Christiane Lerch, and Michael Weiß. Brain activity in goal-directed movements in a real compared to a virtual environment using the Nintendo Wii. *Neuroscience Letters*, 481(1) :47–50, August 2010.

[8] Frédéric Bevilacqua, Bruno Zamborlin, Anthony Sypniewski, Norbert Schnell, Fabrice Guédy, and Nicolas Rasamimanana. Continuous Realtime Gesture Following and Recognition. In *Gesture in Embodied Communication and Human-Computer Interaction*, Lecture Notes in Computer Science, pages 73–84. Springer, Berlin, Heidelberg, February 2009.

[9] Benoit Bideau, Richard Kulpa, Stéphane Ménardais, Laetitia Fradet, Franck Multon, Paul Delamarche, and Bruno Arnaldi. Real Handball Goalkeeper vs. Virtual Handball Thrower. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 12(4) :411–421, August 2003.

[10] Frank Biocca and Mark R. Levy. *Communication in the Age of Virtual Reality*. Routledge, February 2013.

[11] Cyril Bossard, Gilles Kermarrec, Cédric Buche, and Jacques Tisseau. Transfer of learning in virtual environments : a new challenge ? *Virtual Reality*, 12(3) :151–161, March 2008.

[12] Doug A. Bowman, Ryan P. McMahan, and Eric D. Ragan. Questioning Naturalism in 3d User Interfaces. *Commun. ACM*, 55(9) :78–88, September 2012.

[13] E. Brenner, J. B. Smeets, and M. S. Landy. How vertical disparities assist judgements of distance. *Vision Research*, 41(25-26) :3455–3465, 2001.

[14] G. Bruder, F. Argelaguet, A. H. Olivier, and A. Lécuyer. CAVE Size Matters : Effects of Screen Distance and Parallax on Distance Estimation in Large Immersive Display Setups. *Presence*, 25(1) :1–16, July 2016.

[15] William C. Brunner, James R. Korndorffer Jr, Rafael Sierra, Nader N. Massarweh, J. Bruce Dunne, C. Lillian Yau, and Daniel J. Scott. Laparoscopic virtual reality training : Are 30 repetitions enough ?< sup> 1</sup>. *Journal of Surgical Research*, 122(2) :150–156, 2004.

[16] Ayse Bugra. *State and Business in Modern Turkey : A Comparative Study.* SUNY Press, February 1994. Google-Books-ID : Stcz94AYoKYC.

[17] Paul W. Burgess, Nick Alderman, Jon Evans, Hazel Emslie, and Barbara A. Wilson. The ecological validity of tests of executive function. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4(06), November 1998.

[18] Stuart K. Card, Allen Newell, and Thomas P. Moran. *The Psychology of Human-Computer Interaction.* L. Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA, 1983.

[19] Stuartk Card, THOMASP MORAN, and Allen Newell. The model human processor- An engineering model of human performance. *Handbook of perception and human performance.*, 2 :45–1, 1986.

[20] K. Carr and R. England. *Simulated And Virtual Realities : Elements Of Perception.* CRC Press, August 1995. Google-Books-ID : fHHNplvYtS0C.

[21] Emmanuelle Chapoulie, Maud Marchal, Evanthia Dimara, Maria Roussou, Jean-Christophe Lombardo, and George Drettakis. Evaluation of direct manipulation using finger tracking for complex tasks in an immersive cube. *Virtual Reality*, 18(3) :203–217, February 2014.

[22] Taylor W. Cleworth, Brian C. Horslen, and Mark G. Carpenter. Influence of real and virtual heights on standing balance. *Gait & Posture*, 36(2) :172–176, June 2012.

[23] Enguerrand Couka, François Willot, and Dominique Jeulin. A mixed boolean and deposit model for the modeling of metal pigments in paint layers. *Image Analysis & Stereology*, 34(2) :125–134, 2015.

[24] Sarah H Creem-Regehr, Peter Willemsen, Amy A Gooch, and William B Thompson. The Influence of Restricted Viewing Conditions on Egocentric Distance Perception : Implications for Real and Virtual Indoor Environments. *Perception*, 34(2) :191–204, February 2005.

[25] James E. Cutting and Peter M. Vishton. Chapter 3 - Perceiving Layout and Knowing Distances : The Integration, Relative Potency, and Contextual Use of Different Information about Depth*. In *Perception of Space and Motion*, Handbook of Perception and Cognition, pages 69–117. Academic Press, San Diego, 1995. DOI : 10.1016/B978-012240530-3/50005-5.

[26] D Diderot, JLR d'Alembert. *Encyclopédie Ou Dictionnaire Raisonné Des Sciences, Des Arts Et Des Métiers.* Briasson, 1751.

[27] Fernando E. Da Graça, Alexis Paljic, and Emmanuelle Diaz. Evaluating Stereoscopic Visualization for Predictive Rendering. In *23rd WSCG International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, Plzen, Czech Republic, June 2015.

[28] Fernando E. Da Graça, Alexis Paljic, Dominique Lafon-Pham, and Patrick Callet. Stereoscopy for visual simulation of materials of complex appearance. In *Stereoscopic Displays and Applications XXV*, pages 9011–30, San Francisco, United States, February 2014.

[29] Fernando E. Da Graça. *Validations perceptives stéréoscopiques d'Images physico réalistes de matériaux basées sur des modèles de microstructure.* phdthesis, PSL Research University, December 2015.

[30] Fernando E. Da Graça, Alexis Paljic, and Emmanuelle Diaz. Evaluating Stereoscopic Visualization for Predictive Rendering. In *23rd WSCG International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, Plzen, Czech Republic, June 2015.

[31] Nonny de la Peña, Peggy Weil, Joan Llobera, Elias Giannopoulos, Ausiàs Pomés, Bernhard Spanlang, Doron Friedman, Maria V Sanchez-Vives, and Mel Slater. Immersive Journalism : Immersive Virtual Reality for the First-Person Experience of News. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 19(4) :291–301, August 2010.

[32] Pierre De Loor, Kristen Manac'H, Cyril Bossard, and Jacques Tisseau. L'intercompréhension humain-système : Phénoménologie, Enaction et Systèmes Dynamiques Autonomes. In *Interactions et Intercompréhension : une approche comparative*, page 14 pages. EME Edition, March 2013.

[33] Pierre De Loor, Kristen Manac'H, Charlie Windelschmidt, Frédéric Devillers, Pierre Chevaillier, and Jacques Tisseau. Connecting Interactive Arts and Virtual Reality with Enaction. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 11(2) :13 pages, March 2014.

[34] Pierre De Loor and Jacques Tisseau. Réalité Virtuelle et énaction. *Journal de l'Association Française de Réalité Virtuelle*, (10) :3 pages, February 2011.

[35] Pierre de Loor and Jacques Tisseau. Réalité virtuelle et énaction. *Journal de l'Association Française de Réalité Virtuelle*, Février 2011.

[36] Michel Denis. Espaces virtuels. *PSY-Théories, débats, synthèses*, pages 251–266, January 2017.

[37] Julia Diemer, Georg W. Alpers, Henrik M. Peperkorn, Youssef Shiban, and Andreas Mühlberger. The impact of perception and presence on emotional reactions : a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 6 :26, 2015.

[38] Katja Doerschner, Roland W. Fleming, Ozgur Yilmaz, Paul R. Schrater, Bruce Hartung, and Daniel Kersten. Visual Motion and the Perception of Surface Material. *Current biology : CB*, 21(23) :2010–2016, December 2011.

[39] Ajoy S. Fernandes and Steven K. Feiner. Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 201–210. IEEE, 2016.

[40] Philip W. Fink, Patrick S. Foo, and William H. Warren. Obstacle Avoidance During Walking in Real and Virtual Environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4(1), January 2007.

[41] Paul M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6) :381, 1954.

[42] Edwin A. Fleishman, Marilyn K. Quaintance, and Laurie A. Broedling. Taxonomies of Human Performance : The Description of Human Tasks. *ResearchGate*, January 1984.

[43] Edwin A. Fleishman, Marilyn K. Quaintance, and Laurie A. Broedling. *Taxonomies of human performance : The description of human tasks.* Academic Press, 1984.

[44] Edwin A. Fleishman and Maureen E. Reilly. *Analyse de poste de Fleishman : guide d'utilisation (F-JAS).* ECPA - Les Ed. du Centre de psychologie appliquée, 1993. Google-Books-ID : Ij7EAAAACAAJ.

[45] Jonas Forsslund, Sonny Chan, Joshua Selesnick, Kenneth Salisbury, Rebeka G. Silva, and Nikolas H. Blevins. The effect of haptic degrees of freedom on task performance in virtual surgical environments. *Studies in Health Technology and Informatics*, 184 :129–135, 2013.

[46] Jonathan Freeman, Steve E. Avons, Don E. Pearson, and Wijnand A. IJsselsteijn. Effects of sensory information and prior experience on direct subjective ratings of presence. *Presence*, 8(1) :1–13, 1999.

[47] Philippe Fuchs and Guillaume Moreau. *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 2, interfaçage, immersion et interaction en environnement virtuel*, volume 2. Presses des MINES, 2006.

[48] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, and Alain Berthoz. *Le traité de la réalité virtuelle volume 1 : L'Homme et l'environnement virtuel*, volume 1 of *Mathématique et informatique*. Presse des Mines, March 2006.

[49] Franck Ganier, Charlotte Hoareau, and Jacques Tisseau. Evaluation of procedural learning transfer from a virtual environment to a real situation : a case study on tank maintenance training. *Ergonomics*, 57(6) :828–843, June 2014.

[50] Siegfried J. Gerathewohl. Fidelity of Simulation and Transfer of Training : A Review of the Problem. December 1969.

[51] Michael N. Geuss, Jeanine K. Stefanucci, Sarah H. Creem-Regehr, and William B. Thompson. Effect of viewing plane on perceived distances in real and virtual environments. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 38(5) :1242–1253, October 2012.

[52] Omri Gillath, Cade McCall, Phillip R. Shaver, and Jim Blascovich. What Can Virtual Reality Teach Us About Prosocial Tendencies in Real and Virtual Environments ? *Media Psychology*, 11(2) :259–282, June 2008.

[53] Timofey Y. Grechkin, Tien Dat Nguyen, Jodie M. Plumert, James F. Cremer, and Joseph K. Kearney. How Does Presentation Method and Measurement Protocol Affect Distance Estimation in Real and Virtual Environments ? *ACM Trans. Appl. Percept.*, 7(4) :26 :1–26 :18, July 2010.

[54] Richard M. Held and Nathaniel I. Durlach. Telepresence. *Presence : Teleoperators & Virtual Environments*, 1(1) :109–112, 1992.

[55] Lawrence J. Hettinger and Michael W. Haas. *Virtual and Adaptive Environments : Applications, Implications, and Human Performance Issues*. CRC Press, June 2003.

[56] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed Endurance : A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-air Interactions. In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[57] Deborah Hix and H. Rex Hartson. *Developing user interfaces : ensuring usability through product & process*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.

[58] Deborah Hix, J. Edward Swan, Joseph L. Gabbard, Mike McGee, Jim Durbin, and Tony King. User-centered design and evaluation of a real-time battlefield visualization virtual environment. In *Virtual Reality, 1999. Proceedings., IEEE*, pages 96–103. IEEE, 1999.

[59] Kasper Hornbaek. Current practice in measuring usability : Challenges to usability studies and research. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(2) :79–102, February 2006.

[60] Sarah Howlett, Richard Lee, and Carol O'Sullivan. A Framework for Comparing Task Performance in Real and Virtual Scenes. In *Proceedings of the 2Nd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, APGV '05, pages 119–122, New York, NY, USA, 2005. ACM.

[61] V. Interrante, B. Ries, and L. Anderson. Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited. In *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, pages 3–10, March 2006.

[62] Matthieu Ischer, Naëm Baron, Christophe Mermoud, Isabelle Cayeux, Christelle Porcherot, David Sander, and Sylvain Delplanque. How incorporation of scents could enhance immersive virtual experiences. *Frontiers in Psychology*, 5, July 2014.

[63] Jean-François Jégo, Alexis Paljic, and Philippe Fuchs. User-Defined Gestural Interaction : a Study on Gesture Memorization. In *IEEE 3D User Interfaces, 3DUI 2013*, page N/A, Orlando, Fl., United States, March 2013. 8 pages.

[64] Jean-François Jego. *Interaction basée sur des gestes définis par l'utilisateur : Application à la réalité virtuelle.* phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2013.

[65] Jeulin, D and Delarue, A. Numerical Homogeneization of dielectric properties of random media. Application to nano composites. In *Signaux et Milieux Complexes.* Université de Saint-Etienne, 2002.

[66] Jean-François Jégo, Alexis Paljic, and Philippe Fuchs. User-Defined Gestural Interaction : a Study on Gesture Memorization. page N/A, March 2013.

[67] Saltuk Bugra Karahan. *Comparison of performance measures in the virtual environment and real world land navigation tasks.* Monterey, California : Naval Postgraduate School ;Springfield, Va. : Available from National Technical Information Service, September 2000.

[68] Cliff Randell Katerina Mania. Monitoring navigational strategies and idle time in real and virtual environments : an experimental study. 2002.

[69] Jonathan W. Kelly, Bernhard Riecke, Jack M. Loomis, and Andrew C. Beall. Visual control of posture in real and virtual environments. *Perception & Psychophysics*, 70(1) :158–165, January 2008.

[70] Maryam Khademi, Hossein Mousavi Hondori, Lucy Dodakian, Steve Cramer, and Cristina V. Lopes. Comparing "pick and place" task in spatial Augmented Reality versus non-immersive Virtual Reality for rehabilitation setting. *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference*, 2013 :4613–4616, 2013.

[71] R. Kijima and M. Hirose. Representative spherical plane method and composition of object manipulation methods. In *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 195–202, March 1996.

[72] J. J. Kozak, P. A. Hancock, E. J. Arthur, and S. T. Chrysler. Transfer of training from virtual reality. *Ergonomics*, 36(7) :777–784, 1993.

[73] Éditions Larousse. Définitions : écologie - Dictionnaire de français Larousse.

[74] Pontus Larsson, Daniel Västfjäll, and Mendel Kleiner. Auditory-visual interaction in real and virtual rooms. In *Proceedings of the Forum Acusticum, 3rd EAA European Congress on Acoustics, Sevilla, Spain*, 2002.

[75] Jacques Leplat. Simulation et simulateur : principes et usages. *Regards sur l'activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique*, pages 157–181, 1997.

[76] Laure Leroy. *Interfaçage visuel stéréoscopique : diminution de la fatigue visuelle et caractérisation de la perception des formes.* phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2009.

[77] Laure Leroy, Philippe Fuchs, Alexis Paljic, and Guillaume Moreau. Some experiments about shape perception in stereoscopic displays. pages Number 7237–45, January 2009.

[78] Lei Liu, Robert van Liere, Catharina Nieuwenhuizen, and J.-B. Martens. Comparing aimed movements in the real world and in virtual reality. In *Virtual Reality Conference, 2009. VR 2009. IEEE*, pages 219–222. IEEE, 2009.

[79] Benjamin Lok, S. Naik, M. Whitton, and Jr. Brooks, F.P. Effects of handling real objects and avatar fidelity on cognitive task performance in virtual environments. In *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings*, pages 125–132, March 2003.

[80] Anatole Lécuyer. Simulating Haptic Feedback Using Vision : A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 18(1) :39–53, February 2009.

[81] Anatole Lécuyer, Christine Mégard, Jean-Marie Burkhardt, Taegi Lim, Sabine Coquillart, Philippe Coiffet, and Ludovic Graux. The effect of haptic, visual and auditory feedback on an insertion task on a 2-screen workbench. In *Proceedings of the Immersive Projection Technology Symposium*, 2002.

[82] Katerina Mania and Andrew Robinson. An experimental exploration of the relationship between subjective impressions of illumination and physical fidelity. *Computers & Graphics*, 29(1) :49–56, February 2005.

[83] Katerina Mania, Tom Troscianko, Rycharde Hawkes, and Alan Chalmers. Fidelity Metrics for Virtual Environment Simulations Based on Spatial Memory Awareness States. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 12(3) :296–310, June 2003.

[84] Victor Medina. *Visuo-perceptual validation methods for physically based image synthesis.* phdthesis, PSL Research University, May 2016.

[85] Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton, and Frederick P. Brooks, Jr. Physiological Measures of Presence in Stressful Virtual Environments. In *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '02, pages 645–652, New York, NY, USA, 2002. ACM.

[86] Daniel R. Mestre. Immersion and Presence.

[87] M. Mori. *Bukimi no tani [The uncanny valley], Energy,[Online] 7 (4), 33-35.* 1970.

[88] Masahiro Mori, Karl F. MacDorman, and Norri Kageki. The uncanny valley [from the field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(2) :98–100, 2012.

[89] C. Mueller-Tomfelde. Interaction sound feedback in a haptic virtual environment to improve motor skil acquisition. July 2004.

[90] S. Nagata. How to reinforce perception of depth in single two-dimensional pictures. July 1989.

[91] International Fedaration of Robotics. Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots.

[92] Alexis Paljic, Jean-Marie Burkhardt, and Sabine Coquillart. Evaluation of pseudo-haptic feedback for simulating torque : a comparison between isometric and elastic input devices. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proceedings. 12th International Symposium on*, pages 216–223. IEEE, 2004.

[93] Thomas D. Parsons. Neuropsychological Assessment Using Virtual Environments : Enhanced Assessment Technology for Improved Ecological Validity. In Sheryl Brahnam and Lakhmi C. Jain, editors, *Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment*, number 337 in Studies in Computational Intelligence, pages 271–289. Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[94] Thomas D. Parsons. Ecological Validity in Virtual Reality-Based Neuropsychological Assessment. 2015.

[95] Thomas D. Parsons. Virtual Reality for Enhanced Ecological Validity and Experimental Control in the Clinical, Affective and Social Neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, December 2015.

[96] John Patrick. *Training : Research and practice.* Academic Press, 1992.

[97] Randy Pausch, Dennis Proffitt, and George Williams. Quantifying Immersion in Virtual Reality. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '97, pages 13–18, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

[98] Jan A. Pedersen and Torben Jorgensen. Localization performance of real and virtual sound sources. Technical report, DTIC Document, 2005.

[99] Olivier Penelaud. Le paradigme de l'énaction aujourd'hui. *Apports et limites d'une théorie cognitive «révolutionnaire». PLASTIR*, 18, 2010.

[100] N. Pennington, R. Nicolich, and J. Rahm. Transfer of Training Between Cognitive Subskills : Is Knowledge Use Specific ? *Cognitive Psychology*, 28(2) :175–224, April 1995.

[101] Jodie M. Plumert, Joseph K. Kearney, James F. Cremer, and Kara Recker. Distance Perception in Real and Virtual Environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(3) :216–233, July 2005.

[102] I. Poupyrev, T. Ichikawa, S. Weghorst, and M. Billinghurst. Egocentric Object Manipulation in Virtual Environments : Empirical Evaluation of Interaction Techniques. *Computer Graphics Forum*, 17(3) :41–52, August 1998.

[103] E. D. Ragan, R. Kopper, P. Schuchardt, and D. A. Bowman. Studying the Effects of Stereo, Head Tracking, and Field of Regard on a Small-Scale Spatial Judgment Task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(5) :886–896, May 2013.

[104] Clare Regan. Some Effects of Using Virtual Reality Technology. In Robert J. Seidel and Paul R. Chatelier, editors, *Virtual Reality, Training's Future ?*, number 6 in Defense Research Series, pages 77–83. Springer US, 1997. DOI : 10.1007/978-1-4899-0038-8_9.

[105] Rebekka S. Renner, Boris M. Velichkovsky, and Jens R. Helmert. The Perception of Egocentric Distances in Virtual Environments - A Review. *ACM Comput. Surv.*, 46(2) :23 :1–23 :40, December 2013.

[106] G. E. Riccio. Coordination of postural control and vehicular control : Implications for multimodal perception and simulation of self-motion. *Local applications of the ecological approach to human machine systems*, 2 :122–181, 1995.

[107] Bernhard E. Riecke, Markus Heyde, and Heinrich H. Bülthoff. How real is virtual reality really ? Comparing spatial updating using pointing tasks in real and virtual environments. *Journal of Vision*, 1(3) :321–321, December 2001.

[108] George Robertson, Mary Czerwinski, and Maarten van Dantzich. Immersion in Desktop Virtual Reality. In *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '97, pages 11–19, New York, NY, USA, 1997. ACM.

[109] F. D. Rose, E. A. Attree, B. M. Brooks, D. M. Parslow, and P. R. Penn. Training in virtual environments : transfer to real world tasks and equivalence to real task training. *Ergonomics*, 43(4) :494–511, April 2000.

[110] Cynthia S. Sahm, Sarah H. Creem-Regehr, William B. Thompson, and Peter Willemsen. Throwing Versus Walking As Indicators of Distance Perception in Similar Real and Virtual Environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 2(1) :35–45, January 2005.

[111] Maria V. Sanchez-Vives and Mel Slater. From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4) :332–339, April 2005.

[112] HyeonHui Shin and KyeongMi Kim. Virtual reality for cognitive rehabilitation after brain injury : a systematic review. *Journal of Physical Therapy Science*, 27(9) :2999–3002, September 2015.

[113] M. Slater, P. Khanna, J. Mortensen, and Insu Yu. Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29(3) :76–84, May 2009.

[114] Mel Slater. A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3) :1–5, 2003.

[115] Mel Slater. How Colorful Was Your Day ? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 13(4) :484–493, August 2004.

[116] Mel Slater. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B : Biological Sciences*, 364(1535) :3549–3557, December 2009.

[117] Mel Slater, Amela Sadagic, Martin Usoh, and Ralph Schroeder. Small-Group Behavior in a Virtual and Real Environment : A Comparative Study. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 9(1) :37–51, February 2000.

[118] Mel Slater, Bernhard Spanlang, and David Corominas. Simulating Virtual Environments Within Virtual Environments As the Basis for a Psychophysics of Presence. In *ACM SIGGRAPH 2010 Papers*, SIGGRAPH '10, pages 92 :1–92 :9, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[119] David A. Southard. Transformations for stereoscopic visual simulation. *Computers & Graphics*, 16(4) :401–410, December 1992.

[120] Thomas A. Stoffregen, Benoît G. Bardy, and Bruno Mantel. Affordances in the design of enactive systems. *Virtual Reality*, 10(1) :4–10, 2006.

[121] Ioannis Tarnanas, Winfried Schlee, Magda Tsolaki, René Müri, Urs Mosimann, and Tobias Nef. Ecological Validity of Virtual Reality Daily Living Activities Screening for Early Dementia : Longitudinal Study. *JMIR Serious Games*, 1(1) :e1, August 2013.

[122] Ioannis Tarnanas, Magda Tsolaki, Tobias Nef, René M Müri, and Urs P. Mosimann. Can a novel computerized cognitive screening test provide additional information for early detection of Alzheimer's disease ? *Alzheimer's & Dementia : The Journal of the Alzheimer's Association*, 10(6) :790–798, November 2014.

[123] W. Teramoto and B. E. Riecke. Dynamic visual information facilitates object recognition from novel viewpoints. *Journal of Vision*, 10(13) :11–11, November 2010.

[124] B. J. Unger, A. Nicolaidis, P. J. Berkelman, A. Thompson, S. Lederman, R. L. Klatzky, and R. L. Hollis. Virtual peg-in-hole performance using a 6-DOF magnetic levitation haptic device : comparison with real forces and with visual guidance alone. In *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*, pages 263–270, 2002.

[125] B.J. Unger, A. Nicolaidis, P.J. Berkelman, A. Thompson, R.L. Klatzky, and R.L. Hollis. Comparison of 3-D haptic peg-in-hole tasks in real and virtual environments. In *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings*, volume 3, pages 1751–1756 vol.3, 2001.

[126] Martin Usoh, Ernest Catena, Sima Arman, and Mel Slater. Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 9(5) :497–503, October 2000.

[127] Francisco Varela, Evan Thompson, Eleanor Rosch, and others. L'inscription corporelle de l'esprit. *Paris, Seuil*, 1993.

[128] Gérard Vergnaud. *Concepts et schèmes dans une théorie opératoire de la représentation.* 1985.

[129] Antonin Viau, Anatol G. Feldman, Bradford J. McFadyen, and Mindy F. Levin. Reaching in reality and virtual reality : a comparison of movement kinematics in healthy subjects and in adults with hemiparesis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 1(1) :11, December 2004.

[130] Medina Victor, Dominique Lafon-Pham, Alexis Paljic, and Emmanuelle Diaz. Physically based image synthesis of materials : a methodology towards the visual comparison of physical vs. virtual samples. In *Colour and Visual Computing Symposium* , Gjovik, Norway, August 2015.

[131] Medina Victor, Alexis Paljic, and Dominique Lafon-Pham. A study of image exposure for the stereoscopic visualization of sparkling materials. In *IS&T/STIE Electronic Imaging*

2015, San Francisco, United States, February 2015. International Society for Optics and Photonics.

[132] Cyril Vienne, Justin Plantier, Pascaline Neveu, and Anne-Emmanuelle Priot. The Role of Vertical Disparity in Distance and Depth Perception as Revealed by Different Stereo-Camera Configurations. *i-Perception*, 7(6), December 2016.

[133] D. Villani, C. Repetto, P. Cipresso, and G. Riva. May I experience more presence in doing the same thing in virtual reality than in reality ? An answer from a simulated job interview. *Interacting with Computers*, 24(4) :265–272, July 2012.

[134] Zheng Wang, Elias Giannopoulos, Mel Slater, Angelika Peer, and Martin Buss. Handshake : Realistic Human-Robot Interaction in Haptic Enhanced Virtual Reality. *Presence*, 20 :371–392, August 2011.

[135] Colin Ware, Kevin Arthur, and Kellogg S. Booth. Fish Tank Virtual Reality. In *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '93, pages 37–42, New York, NY, USA, 1993. ACM.

[136] Merrill E. Warkentin, Lutfus Sayeed, and Ross Hightower. Virtual Teams versus Face-to-Face Teams : An Exploratory Study of a Web-based Conference System*. *Decision Sciences*, 28(4) :975–996, 1997.

[137] Mark Warschauer. Comparing face-to-face and electronic discussion in the second language classroom. *CALICO journal*, 13(2&3) :7–26, 1995.

[138] Bernhard Weber, Mikel Sagardia, Thomas Hulin, and Carsten Preusche. Visual, Vibrotactile, and Force Feedback of Collisions in Virtual Environments : Effects on Performance, Mental Workload and Spatial Orientation. In Randall Shumaker, editor, *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments*, number 8021 in Lecture Notes in Computer Science, pages 241–250. Springer Berlin Heidelberg, July 2013. DOI : 10.1007/978-3-642-39405-8_28.

[139] Vincent Weistroffer. *Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle.* phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2014.

[140] Gunnar Wendt, Franz Faul, Vebjørn Ekroll, and Rainer Mausfeld. Disparity, motion, and color information improve gloss constancy performance. *Journal of Vision*, 10(9) :7, September 2010.

[141] Alexander Wilkie, Andrea Weidlich, Marcus Magnor, and Alan Chalmers. Predictive Rendering. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses*, SIGGRAPH ASIA '09, pages 12 :1–12 :428, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[142] Betsy Williams, Gayathri Narasimham, Claire Westerman, John Rieser, and Bobby Bodenheimer. Functional Similarities in Spatial Representations Between Real and Virtual Environments. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 4(2), July 2007.

[143] Mark Alan Wilson, Winston Bennett Jr, Shanan Gwaltney Gibson, and George Michael Alliger. *The Handbook of Work Analysis : Methods, Systems, Applications and Science of Work Measurement in Organizations.* Routledge, May 2013. Google-Books-ID : So8ors0EAWEC.

[144] Bob G. Witmer and Michael J. Singer. Measuring presence in virtual environments : A presence questionnaire. *Presence : Teleoperators and virtual environments*, 7(3) :225–240, 1998.

[145] D. Wuillemin, G. van Doorn, B. Richardson, and M. Symmons. Haptic and visual size judgements in virtual and real environments. In *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*, pages 86–89, March 2005.

[146] Y. Y. Yeh and L. D. Silverstein. Spatial judgments with monoscopic and stereoscopic presentation of perspective displays. *Human Factors*, 34(5) :583–600, October 1992.

[147] Tsuneo Yoshikawa, Masayuki Kawai, and Kouki Yoshimoto. Toward Observation of Human Assembly Skill Using Virtual Task Space. In Prof Bruno Siciliano and Prof Paolo Dario, editors, *Experimental Robotics VIII*, number 5 in Springer Tracts in Advanced Robotics, pages 540–549. Springer Berlin Heidelberg, 2003.

[148] I. Yu, J. Mortensen, P. Khanna, and M. Slater. Visual realism enhances realistic response in an immersive virtual environment ; Part 2. *IEEE Computer Graphics and Applications*, PP(99) :1–1, 2011.

[149] Ying Zhang and Terrence Fernando. 3d Sound Feedback Act As Task Aid in a Virtual Assembly Environment. In *Proceedings of the Theory and Practice of Computer Graphics 2003*, TPCG '03, pages 209–, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.

[150] Christine J. Ziemer, Jodie M. Plumert, James F. Cremer, and Joseph K. Kearney. Estimating Distance in Real and Virtual Environments : Does Order Make a Difference ? *Attention, perception & psychophysics*, 71(5) :1095–1106, July 2009.

Annexes

9.3 Classification des aptitudes de Fleishman

Je liste des Habiletés Humaines proposées par Fleishman dans le contexte de l'analyse du travail [43][44].

Cognitive (21 Scales) :

Oral comprehension,,Written comprehension, Oral expression, Written expression, Fluency of ideas, Originality Memorization, Problem sensitivity, Mathematical reasoning, Number facility, Deductive reasoning, Inductive reasoning, Information gathering, Category flexibility, Speed of closure, Flexibility of closure, Spatial orientation, Visualization, Perceptual speed, Control precision, Multiple coordination, Response orientation.

Psychomotor (10 Scales) :

Rate control, Reaction time, Arm-hand steadiness, Manual dexterity, Finger dexterity, Wrist-finger speed, Speed of limb movement, Selective attention, Time sharing.

Physical (9 Scales) :

Static strength, Explosive strength, Dynamic strength, Trunk strength, Extent flexibility, Dynamic flexibility, Gross body coordination, Gross body equilibrium, Stamina.

Sensory/perception (12 Scales) :

Near vision, Far vision, Visual color discrimination, Night vision, Peripheral vision, Depth perception, Glare sensitivity, General hearing, Auditory attention, Sound localization, Speech hearing, Speech clarity.

Social/inter-personal skills and abilities (21 Scales)

Référence non disponible à la date de rédaction du document.

9.4 Tableaux des résultats de Comparaisons Réel - Virtuel

Tâche	Type de Système	Résultats	Analyse	Référence
Saisir et déplacer une balle	Moniteur [1], Retour d'effort digital (Cyberglove)	*Cohérence spatiale et temporelle des mouvements entre réel et virtuel*	*tendance des sujets à réduire le mouvement de poignet et augmenter le mouvement du coude en virtuel. hypothèses : absence de stéréoscopie. L'article n'indique pas si la représentation des mouvements est à l'échelle 1*	[129]
Jeu de Golf sur Console de Jeu Nintendo Wii	Ecran [2], console de Jeu avec acquisition de mouvement	*Mesures d'Électroencéphalographie : Les bandes de Fréquence Alpha 2 et Théta sont plus faibles en virtuel*	*l'article émet des hypothèses d'attention supérieure en Réel (Théta) et de Quantité d'information disponible et traitée en réel (Alpha 2)*	[7]
Pointage	Moniteur ou RA en manipulation Directe	*Perf pointage Directe en RA > Perf Moniteur*	*coordination signal visuel, mouvement physique, proprioception*	[70]
Pointage	Moniteur Manipulation Indirecte, Réel Manipulation Directe	*Temps de pointage Virtuel 2 fois supérieur en moyenne au réel. Phase Ballistique plus difficile en virtuel.*	-	[78]
Placement et Classement d'Objets par attributs (Type, Luminance) dans une étagère.	Ecran Mono. Eye Tracking.	*En Virtuel, les fixations sont beaucoup plus centrées sur l'objet en cours de manipulation et moins sur les coups d'œil en avance pour chercher un espace libre pour placer l'objet.*	*Donc en virtuel la tendance n'est pas à la planification mais à la gestion, un objet à la fois, de son déplacement.*	[60]

TABLE 9.1 – Comparaison Réel - Virtuel. **Pointage, placement d'objets**

Tâche	Type de Système	Résultats	Analyse	Référence
Jeu du Cerceau et du Fil conducteur	Hmd, Sans Haptique	*performances réduite en virtuel, mais prise en compte du visuel, et progression de la performance dans le temps.*	*latence, absence de retour tactile*	[3]
Insertion d'une cheville dans un trou	Moniteur, Retour d'effort sur poignée magnétique 6ddl	*Perf Réel > Perf Visuel et Haptique > perf Visuel Seul*	*intégration multisensorielle bénéfique, pistes d'amélioration possibles : manipulation directe, latence*	[125][124]
Insertion d'une cheville dans un trou	Moniteur, Retour d'effort sur pouce et index, 2D	*Perf. Réel > Perf. Virtuel. Ordonancement en performances des différentes stratégies identique entre réel et virtuel.*	*Possible amélioration : raideur du périphérique.*	[147]
Lego	Moniteur, Bras à Retour d'effort	*Perf. Réel 2,7 fois plus rapide que Perf. Virtuel.*	*Deux mains et manipulation multidigitale possible en réel. Utilisateurs Novices, Utilisateurs entraînés peuvent atteindre des performances identiques.*	[5]
Vider dans un réceptacle un bac rempli de balles	CAVE, sans haptique, Finger Tracking, Hand Tracking	*Toutes les tâches en virtuel sont plus longues à réaliser*[3]	*Les auteurs égalisent la difficulté entre réel et virtuel dans une expérience préalable*[4]	[21]
Reproduction d'un motif dans un assemblage de cubes colorés	Réel, HMD Hybride (Cubes Physiques et Représentation Virtuelle en RA), HMD Virtuel Pur (Sans Cubes Physiques)	*Perf. Réel > Perf. Hybride > Perf. Virtuel Pur. L'ajout d'objets physiques rapproche les performances vers le réel*	*L'absence de contraintes physiques dans développement de stratégies spécifiques à la VR pure (laisser les blocs flotter dans l'espace de manipulation)*	[79]

TABLE 9.2 – Comparaison Réel - Virtuel. **Manipulation d'Objets et Assemblage**

4. La maximisation du nombre de degrés de liberté suivis et pris en compte dans le moteur physique (1 ou deux mains, prise en compte individuelle des doigts) n'implique pas un rapprochement des résultats du virtuel au réel. Elles améliorent cependant des critères subjectifs : plausibilité, facilité d'usage.

4. égalisation des performances réel/virtuel en amont de l'expérience (objectif : contrer les limitations du moteur physique qui ne simule qu'approximativement la dynamique des balles), dans une pré-étude en jouant sur la hauteur du bac et la nature mécanique des balles réelles.

Tâche	Type de Système	Résultats	Analyse	Référence
Se tenir en équilibre les yeux fermés, puis yeux ouverts. Selon différentes postures : pieds à plat ou sur la pointe des pieds (réputée plus instable). [5]	Casque	*la vision stabilise moins en virtuel qu'en réel (si on égalise le champ de vision en réel à celui du casque, la différence est moindre mais reste inférieure).*	*la latence participe de ce résultat, mais n'explique pas la totalité, hypothèses : poids du casque, sensation de présence.*	[69]
Se tenir debout sur un plateau, dont on augmente la hauteur (2 conditions : 0,80m et 3,20m au dessus du sol) réellement ou virtuellement	Casque	*Cohérence des variations des marqueurs de posture entre Réel et Virtuel : a) Augmentation, avec la hauteur, pour : réponse electrodermale, anxiété, peur, fréquence de centre de pression (CDP) au sol. b) Réduction avec la hauteur de la stabilité perçue, confiance dans son équilibre, et amplitude du CDP. Variation de la Sensation de peur inférieure en virtuel. Dans l'environnement réel les sujets se penchent plus vers le bord qu'en virtuel.*	*Résultats proches réel/virtuel explicables par l'optimisation des paramètres techniques (Latence, Réalisme Graphique). Question ouverte de la relation entre le sentiment de peur et l'action de se pencher au bord (pourquoi se penche-t-on moins en RV ?).*	[22]
Evitement d'obstacle lors de la marche vers un point cible. Test dans deux conditions (réel et virtuel) du modèle de trajectoire de Fajen et Warren.	Casque	*60% des participants s'écartent légèrement plus de l'obstacle en virtuel qu'en réel (16cm). Qualitativement les trajectoires sont comparables.*	*Taux de répulsion de l'obstacle est inférieur en virtuel, et taux de rotation plus rapide vers la cible (deux paramètres du modèle testé) : peut être dû au champ de vision, l'absence d'avatar.*	[40]
Arrêts de lancers en handball. Le lanceur est affiché en fil de fer.	CAVE	*Trajectoires des centres de masse de la cuisse et du bras (sur l'axe vertical) très proches des trajectoires réelles. Différence de déplacement (distance parcourue) maximum de 11%. En virtuel, comme en réel, c'est bien le mouvement du lanceur -avant le lancer effectif- et non la trajectoire de la balle qui est prise en compte.*	*Une piste d'amélioration de la représentativité de la situation réelle, est l'ajout d'interactions entre lanceur et gardien.*	[9]

TABLE 9.3 – Comparaison Réel - Virtuel. **Comportement Postural**

Tâche	Type de Système	Résultats	Analyse	Référence
Contexte de Déplacement dans un bâtiment, 3 tâches. 1. Reconnaitre des lieux spécifiques sur une photo (*Landmarks*), 2. Refaire un Cheminement dans le sens opposé (*Spatial Knowledge*), 3. Pointer vers le point de départ(*Survey*)	3 écrans monoscopiques, 103 degrés de champ de vision	*corrélation des performances entre réel et virtuel pour Landmarks, pas pour Spatial Knowledge et Survey (performances pauvres en RV)*	*Il est facile en réel de regarder par dessus son épaule pour vérifier son chemin ou sa position, action plus difficile (périphérique de commande en vitesse) pour 2. et 3. en virtuel.*	[67]
Observer une pièce dans laquelle divers objets sont disposés. Reporter ensuite la position de ces objets sur un plan. Indiquer son niveau de confiance (*awareness state*) pour chaque objet : je me **souviens**, je **sais**, c'est **familier**, je **devine**.	Réel, Casque mono head-tracked, Casque stereo head-tracked, Desktop, Casque mono et Souris pour s'orienter.	*Si l'on choisit la performance comme critère de réponse réaliste : le réel et casque en mono + head tracking sont les plus proches. Si l'on choisit l'état mental comme critère de réponse réaliste c'est le réel et Casque + Souris*	*Une immersion moins naturelle (rotation à la souris), semble procurer un état mental plus proche des mesures en réel. La proposition principale de l'article est que l'état mental (awareness state) est à considérer comme une métrique de représentativité de l'expérience subjective de la tâche de remémoration spatiale*	[83]
Idem que précédent. Mesure du Temps d'Immobilité lors de l'observation	Idem que précédent	*Le temps d'immobilité pour la condition casque stereo head tracking est plus long en virtuel. Pas de différence significative entre casque mono et réel*	*la stratégie de navigation plus statique avec l'ajout de la stéréoscopie. Concentration, ou fatigue visuelle supérieure ?*	[68]
Observation d'une piece, rotation du siège, pointer vers les objets signalés par audio	Casque	*Temps de réponse, Erreur de pointage, meilleurs en Réel*	*Rôle fort du champ de vision, la limitation du champ de vision dans le cas réel (égalisé à celui du casque : 40×30 deg) égalise les résultats.*	[107]
Observation d'une pièce, apprentissage de la position de divers objets selon les deux cas réel et virtuel	Casque	*Retrouver la direction d'un objet après divers types de perturbation du point de vue initial : géométrique du point de vue (translation ou rotation), mode de locomotion pour la perturbation (physique, imaginé), amplitude de la différence. Comportement fonctionnel, i.e. les variations de performances sont identiques en réel et virtuel.*	-	[142]

TABLE 9.4 – Comparaison Réel - Virtuel. **Niveau Cognitif : Navigation, Représentation de l'espace**

Tâche	Type de Système	Résultats	Analyse	Référence
Deux personnes résolvent collaborativement un puzzle (réunir 8 pièces pour former un cube)	Une personne dans un CAVE, l'autre sur station (écran simple). Chacun représenté par un avatar simple. Communication par micro et écouteurs.	*Notation subjective du niveau de collaboration supérieure en réel qu'en virtuel. Dans chaque cas (réel ou virtuel) le niveau de collaboration perçu par chaque participant est identique*	-	[4]
Reconstituer collaborativement des phrases à partir de mots éparpillés sur des feuilles virtuelles dans une pièce. En amont de cette tâche, trouver cette pièce. Ceci pendant 15 minutes, puis passage dans la même situation en réel	Pour chaque groupe : 1 personne dans un CAVE, deux sur station	*La personne dans le CAVE devient le leader, cette émergence n'a pas lieu dans le cas réel. L'inconfort social peut être provoqué dans le virtuel et le réel (un des participants devait regarder de façon insistante un autre). L'accord dans les groupes tend à être supérieur lorsque qu'une femme est présente dans le groupe*	-	[117]
Entretien d'embauche. Cas réel : décor d'ambiance non professionnelle, une table 2 chaises et un interlocuteur réel. Cas Virtuel : ajout d'éléments de contexte professionels (type salle de réunion, livres, ordinateurs)	Casque	*Anxiété perçue supérieure en virtuel (questionnaire subjectif) , mais réponse electrodermale (plus faible en virtuel)*	*Discussion : Formellement les deux situations (réel et virtuel ne sont pas les mêmes) puisque le cas virtuel est augmenté d'éléments destinés à augmenter l'anxiété.*	[133]
Rencontrer des personnes, dont certaines expriment par leur comportement corporel une demande d'aide.	Casque	*Cohérence Virtuel Réel sur les réactions émotionnelles (proxémie et direction du regard) à une personne en difficulté, ou ne présentant pas de signes apparents de détresse.*	-	[52]

TABLE 9.5 – Comparaison Réel - Virtuel. **Niveau Interpersonnel**

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Alexis Paljic.

Résumé

Réponse Réaliste en Réalité Virtuelle
Le contexte de ces travaux est celui de la simulation en environnements virtuels immersifs d'activités humaines réelles. Je m'intéresse à la *réponse réaliste* de l'humain en environnement virtuel que je définis comme la similitude du comportement humain entre une activité réalisée en environnement virtuel et l'activité réelle. Je désigne par *immersion* la nature des interfaces proposées par un système de réalité virtuelle. J'expose dans ce document mes travaux dont l'objet est de chercher les modalités d'immersion qui favorisent la réponse réaliste de l'utilisateur. La réponse réaliste est une question centrale à l'étude de l'activité humaine dans le cadre d'activités écologiques, pour lesquelles le caractère prédictif de la réalité virtuelle est la raison même de son usage : conception d'objets ou de postes de travail avant l'existence de prototypes physiques, évaluation objective de l'activité dans le contexte thérapeutique. Ma méthode de recherche est basée sur la comparaison entre le réel et le virtuel, sur des critères objectifs et subjectifs de l'activité. Ma contribution est d'une part d'établir les descripteurs de l'activité pour lesquels la réponse est réaliste, ceux pour lesquels elle ne l'est pas, et d'autre part en explorer les raisons et donner des pistes d'amélioration. J'aborde quatre activités de nature différentes : l'observation de matériaux, l'observation de la taille et la forme d'objets, le geste de manipulation d'objets et la coopération homme-robot.

Abstract

Realistic Response in Virtual Reality
The context of this work is the simulation of real human activities in immersive virtual environments. I am interested in the question of human *realistic response* in virtual environments which i define as the similarity of human behavior in an activity that is performed in a virtual context, compared to the real activity. I point out *immersion* as the nature of the interfaces of the virtual reality system. This document is a synthesis of my work whose objective is to seek immersion modalities that enable realistic response. Realistic response is a central question to the study of human ecological activites, for which the predictive nature of virtual reality is the very reason for its use : the design of objects or working stations before the existence of actual prototypes, or the objective evaluation of the activity in the therapeutic context. My research method is based on the comparison between the virtual and the real, using objective and subjective criteria. My contribution is to establish the descriptors of human activity for which human response is realistic, those for which it is not, and secondly explore the reasons for these results and open research towards potential solutions. I present four different activities : observation of materials, observation of shape and size of objects, gestures when manipulating objects, and finally human-robot cooperation.