



HAL
open science

Retour sensoriel du toucher dans les environnements virtuels

Antoine Lassagne

► **To cite this version:**

Antoine Lassagne. Retour sensoriel du toucher dans les environnements virtuels. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2018. Français. NNT : 2018ENAM0019 . tel-01866723

HAL Id: tel-01866723

<https://pastel.hal.science/tel-01866723>

Submitted on 3 Sep 2018

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

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

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Informatique – traitement du signal"

présentée et soutenue publiquement par

Antoine LASSAGNE

le 28 mai 2018

Retour sensoriel du toucher dans des environnements virtuels

Directeur de thèse : **Andras KEMENY**

Co-encadrants de thèse : **Frederic MERIENNE et Javier POSSELT**

Jury

M. Christophe Chaillou,	Professeur, Université de Lille	Président
M. Jean-Christophe Popieul,	Professeur, Univ. de Valenciennes	Rapporteur
M. Franck Mars,	Chargé de Recherche, LS2N	Rapporteur
M. Andras Kemeny,	Professeur, Arts & Métiers	Examineur
M. Frédéric Merienne,	Professeur, Arts & Métiers	Examineur
M. Javier Posselt,	Ingénieur, Renault S.A.S.	Examineur

THÈSE

RÉSUMÉ

Ce projet de thèse de doctorat traite du retour sensoriel du toucher dans des environnements virtuels. La partie théorique s'intéresse aux différents schémas de perception du toucher et aux modalités haptiques correspondantes. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur la pertinence de chaque modalité pour chaque usage, à leur compatibilité avec les systèmes visuels qui ont une place très importante en réalité virtuelle, ainsi qu'aux réponses aux problématiques visuelles inhérentes à chaque cas. Ces réflexions nous ont amenés à évaluer les méthodes d'haptique passive et de substitution sensorielle dans le cadre d'interactions dans des CAVEs. Les résultats mettent en lumière l'importance du choix de la modalité en parallèle avec celle de la construction du scénario, mais aussi les difficultés à colocaliser les moteurs haptiques et visuels. Les interactions peuvent souffrir de performances insuffisantes si des précautions ne sont pas prises. Enfin, nous avons testé quelques méthodes logicielles visant à améliorer les performances des sujets lorsqu'ils interagissent.

ABSTRACT

This thesis tackles the subject of the feedbacks of interactions in virtual environments. The theoretical part addresses the different perception schemes and the corresponding haptic modalities. We especially focused on the relevance of each modality for each use-case, on the compatibility with the visual systems which take an important place in virtual reality, and on the problematics of each situation. These studies led us to evaluate passive haptics and sensory substitution for interactions in CAVEs. The results show the importance of choosing the right modality relative to the scenario design. We also evaluated how mismatched the visual and haptic workfield can be, and how the performance of interactions suffers from this fact. Ultimately, we tested a few software-based methods meant to improve the performance of the interactions of the subjects.

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier Javier Posselt, encadrant de cette thèse dans l'entreprise, pour son suivi rigoureux, son soutien permanent, son ouverture et sa curiosité, et ses efforts à m'intégrer dans les schémas de l'entreprise. Grâce à Javier, j'ai pu aborder les sujets qui m'intéressaient, obtenir les moyens nécessaires aux études de cette thèse, et en apprendre beaucoup sur les méthodes de travail de l'industrie et de la structure de grande entreprise.

Un grand merci à mon directeur de thèse Andras Kemeny et mon co-encadrant Frédéric Merienne, qui m'ont fourni de nombreuses inspirations dans mes travaux ainsi qu'un support méthodique efficace pour la mise en place des protocoles expérimentaux et la rédaction des articles.

J'aimerais également remercier Stéphane Régnier, pour ses idées, son efficacité et ses conseils.

Les autres doctorants du service, Benoit, Carolina, Guillaume, Léa, Armand, Martin, pour leur compagnie, leur aide matérielle, et pour nos réflexions communes sur les sujets scientifiques qui nous concernaient.

Le reste de mon UET, avec René, Thomas, Michael avec lesquels j'ai principalement interagit.

Pour finir, j'aimerais remercier l'ensemble des collaborateurs du service DEA-TDV, la plupart m'ayant fourni aide, amitié et conseils. Je pense notamment à Vincent, Lucie, Romain, Quentin, Florent, qui m'ont particulièrement assisté ou m'ont offert l'opportunité d'en apprendre sur des sujets différents.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
1 Cas d'usages et applications	3
Avant-propos	3
La Réalité Virtuelle et l'industrie	3
Un outil nouveau	4
Des changements radicaux	6
À propos de cette thèse	7
Acteurs et objectifs	7
Méthodologie de travail	8
Des applications variées et spécifiques	9
1.1 Ergonomie	12
1.1.1 Réglage du rétroviseur.	12
1.1.2 Manipulation de la boîte à gant.	13
1.1.3 Perception des volumes intérieurs	13
1.1.4 Atteignabilités du coffre.	14
1.1.5 Console centrale	14
1.2 Architecture intérieure	15
1.2.1 Architecture de la planche de bord	15
1.3 Qualité perçue	15
1.3.1 Ressenti de textures	15
1.4 Apprentissage	17
1.4.1 Montage virtuel	17
1.4.2 Maintenance virtuelle	17
1.5 Téléopération	18
1.5.1 Montage	18
1.5.2 Téléopération collaborative	19
Généralisation	19
2 Processus d'interaction	21
2.1 Mécanismes de perception du toucher	22
2.1.1 La perception cutanée	22
2.1.2 La contrainte kinesthésique	26

2.1.3	Aspects psychologiques et fluctuations	28
2.2	Effets multisensoriels	30
2.2.1	Profondeur et contact	31
2.2.2	Priorité sensorielle	32
2.2.3	Compléments et substituts sensoriels	33
2.2.4	L'apprentissage	34
2.2.5	Présence	36
2.3	Rendu haptique	39
2.3.1	Acquisition des données	40
2.3.2	Détection de collision	40
2.3.3	Calcul des efforts et détermination des réponses	40
2.3.4	Application des retours	42
2.3.5	Temps de latence	43
3	Systèmes d'affichage et technologies associées	45
3.1	Le visuel indispensable à l'haptique et la présence	45
3.1.1	Indispensable mais imparfait	45
3.1.2	Caractéristiques d'un afficheur	46
3.2	CAVE Automatic Virtual Environment (CAVE)	47
3.2.1	Principe de fonctionnement des CAVEs	47
3.2.2	Toucher le virtuel	48
3.2.3	Dans l'industrie	50
3.3	Head-Mounted Displays (HMDs)	50
3.3.1	Bref historique	50
3.3.2	Un casque d'aujourd'hui	51
3.3.3	En haptique	52
3.4	Technologies et limitations	53
3.4.1	Avatar	53
3.4.2	Ombres et lumières	56
3.5	Environnements collaboratifs	56
3.5.1	Capacités collaboratives des systèmes d'affichage	57
3.5.2	L'interaction à la base du collaboratif	58
4	Dispositifs d'interaction haptique	59
4.1	Introduction aux dispositifs haptiques	59
4.1.1	Classifier les systèmes haptiques	59
4.1.2	Problématiques industrielles	61
4.2	Les dispositifs à rendu cutané	62
4.2.1	Les systèmes vibrotactiles	62
4.2.2	Les autres systèmes portables (<i>Wearables</i>)	66
4.2.3	Les dispositifs d'haptique sans contact	67
4.3	Les dispositifs à rendu kinesthésique	70
4.3.1	Les bras haptiques et les exosquelettes	70
4.3.2	Les systèmes à fils tendus (SPIDAR-like)	75
4.3.3	Haptique passive	77
4.4	Dispositifs complémentaires	82
4.4.1	Localisation dans l'espace	82

5	Le visuel en conflit avec les interactions	85
5.1	Le visuel étroitement lié au toucher	85
5.2	Sources de défauts visuels	86
5.2.1	Défauts matériels	87
5.2.2	Écart inter-pupillaire (IPD)	87
5.2.3	Profondeur des yeux	88
5.2.4	Hauteur des yeux	88
5.2.5	Conflit d'accommodation et de vergence	90
5.2.6	Manque d'indices visuels	90
5.3	Gestion de ces défauts dans la simulation	90
5.3.1	Influence des défauts	90
5.3.2	Solutions adaptées	91
6	Conception d'interfaces hommes-machines en réalité virtuelle	92
6.1	Introduction et contexte	92
6.1.1	État de l'art spécifique	92
6.2	Objectifs et questions de recherche	94
6.2.1	Question de recherche	94
6.3	Implémentation	94
6.3.1	Apparatus	94
6.3.2	Panel de sujets	96
6.4	Déroulement de l'expérimentation	97
6.4.1	Instructions aux sujets	97
6.4.2	Calibration subjective	97
6.4.3	Séries	98
6.5	Résultats	100
6.5.1	Temps d'exécution	100
6.5.2	Erreur Relative	101
6.5.3	Opinion des sujets	102
6.5.4	Questionnaires	103
6.6	Discussion	104
6.6.1	Système favori	104
6.6.2	Recalibrations	105
6.6.3	Disparités entre les sujets	105
6.6.4	Apprentissage In-the-Loop (AIL)	105
6.6.5	Influence du contexte	105
6.7	Conclusion	106
7	Influence de la dynamique et du contexte	107
7.1	Approfondir la simulation	107
7.2	Objectifs et questions de recherche	107
7.2.1	Hypothèses préliminaires	108
7.3	Variations dans le processus expérimental	108
7.4	Résultats	110
7.4.1	Temps d'exécution	110
7.4.2	Erreur relative	110
7.4.3	Opinion des sujets	111
7.5	Discussion	113
7.5.1	Perception spatiale	113
7.5.2	Le choix du meilleur système d'interaction	114

7.6	Conclusions et implications	115
8	Filtrage logiciel de la perception spatiale	117
8.1	Élaboration de l'algorithme de filtrage par resimulation	118
8.1.1	Algorithmie	118
8.1.2	Resimulation	119
8.1.3	Techniques de filtrage	119
8.1.4	Limiter la dérive	122
8.1.5	Filtrage par logique floue	122
8.2	Validation du filtrage par l'expérimentation	124
8.2.1	Apparatus	125
8.2.2	Résultats	125
8.2.3	Discussion	126
8.3	Perspectives : système de calibration sans mesure de morphologie	126
	Conclusion	129
	Liste des figures	131
	Liste des tableaux	133
	Listes des citations	134
	Bibliographie	135
	Index	145
	Annexes	A
A	Publications	A
1.1	Article 1	A-I
1.2	Article 2	B-I
1.3	Article 3	C-I
1.4	Brevet – Revendications et abrégé	C-XVI

INTRODUCTION

Depuis l'année 2015 et les annonces médiatisées de casques de réalité virtuelle (HMD) grand public tels ceux d'HTC, d'Oculus ou de Sony, chaque année se présente comme *l'année de la réalité virtuelle*. Le raz-de-marée attendu depuis les années 1990 se fait attendre, mais les technologies progressent indubitablement et permettent déjà un début de démocratisation dans de nombreux domaines.

Les technologies visuelles d'aujourd'hui permettent déjà depuis plusieurs années aux multinationales bien dotées financièrement de disposer d'outils de visualisation extrêmement performants. Ces entreprises sont sans cesse demandeuses de plus de réalisme, de plus de performance, de plus de présence virtuelle. Les ingénieurs qui utilisent ces technologies les apprécient, mais la qualité visuelle récente des environnements virtuels révèle d'autant plus le manque d'autres perceptions, jusqu'à présent laissées en marge. Parmi ces autres perceptions, l'haptique ou le "toucher virtuel" représente l'un des plus forts besoins, tant son usage est important pour interagir et porter la simulation à de nouveaux usages.

Citation

« One of the most disconcertingly unnatural properties of most virtual environments (VEs) is the ability of the user to pass through objects. » [Insko, 2001]

Comme le révèle cette citation, et tant d'autres, et tant d'exemples dans l'utilisation de tous les jours de systèmes de réalité virtuelle, l'haptique est l'un des premiers manques qui transparaît immédiatement lors des simulations. En réalité virtuelle, créer une simulation réaliste consiste souvent à fournir au cerveau suffisamment d'informations perceptives qui permettent au sujet de croire à sa présence dans un monde cohérent. Pour ce faire, il est évident que l'ajout de modalités haptiques est capital, d'autant plus que le toucher permet non seulement la réception de stimuli mais également l'émission d'intentions en rétroaction. Cet aspect bidirectionnel, que l'on retrouve par exemple dans le couple ouïe / voix, est indispensable à l'interaction, et donc à l'utilisation active de la réalité virtuelle.

Les bénéfices connus de l'haptique

Présence, immersion, performances... Les bénéfices des retours d'efforts et / ou cutanés sont établis depuis bien longtemps, et la majorité des expérimentations qui ont mis en scène un système haptique suffisamment performant lui ont trouvé des avantages indéniables [Brooks, 1999]. L'haptique permet notamment de libérer la charge cognitive nécessaire à la vision lorsque celle-ci tente justement de compenser l'absence de toucher [Robles-De-La-Torre, 2006], mais elle permet également de déployer tout un panel d'interactions et de perceptions nouvelles. Les environnements virtuels n'ont alors pas besoin de se surcharger d'informations visuelles tant l'haptique peut véhiculer de données mécaniques et spatiales sur les objets touchés. Et même en considérant des retours haptiques symboliques, sans toucher virtuel, les bénéfices de l'ajout du retour sur interaction s'avèrent significatifs.

La prochaine étape de la réalité virtuelle dans l'industrie

Dans l'industrie de l'automobile, les simulateurs de réalité virtuelle sont déjà inscrits depuis quelques années dans les processus de conception des nouveaux véhicules. Éclairage, ergonomie, architecture, design, formation, les applications sont nombreuses alors que le sujet n'en est encore qu'à ses balbutiements. Or, les utilisateurs sont unanimes : pour développer de nouveaux cas d'usage, il faut implémenter des capacités d'interaction avec le monde virtuel, notamment par l'intermédiaire de l'haptique. De nombreux laboratoires travaillent sur le sujet et développent diverses solutions, bien souvent pleines de compromis, tant il est difficile de reproduire toutes les modalités de l'haptique avec fidélité et efficacité.

Acronymes récurrents

- CAVE : Cave Automatic Virtual Environment
- HMD : Head Mounted Display
- RV / VR, RA / AR : Réalité virtuelle / Virtual Reality, Réalité augmentée / Augmented Reality.
- DDL / DOF : Degré de liberté, Degree of Freedom
- FoV : Field of View ou champs de vision.
- JND / JNV : Just Noticeable Difference / Value.
- IHM : Interface Hommes-Machines
- PoC : Proof of Concept

D'autres termes techniques sont référencés dans l'index.

CHAPITRE 1

CAS D'USAGES ET APPLICATIONS

AVANT-PROPOS

La réalité virtuelle et l'industrie

L'usage des nouveaux outils numériques, ou *l'accélération digitale*, est et a toujours été un levier important de diminution des coûts et d'amélioration des produits pour les industries lourdes comme l'automobile. Dès 1981, des outils comme CATIA¹ ont permis de remplacer les planches à dessin et de révolutionner la conception. Bien sûr, l'informatique n'en était alors qu'à ses débuts et ces logiciels ne fonctionnaient que sur des *mainframes* ou sur des plateformes UNIX. À cette époque, la conception numérique s'est pourtant rapidement imposée comme un outil indispensable, apportant de la flexibilité, des processus plus rapides, des possibilités nouvelles. La conception numérique, après la 2D, se dirige maintenant naturellement vers la 3D, afin de pousser le WYSIWYG (*What you see is what you get*) encore plus loin.

Mais cette nouvelle façon de travailler s'est heurtée aux besoins bien spécifiques des entreprises : des outils fiables, robustes, validés, un support technique fort, des gains chiffrés, une prise de risque calculée pour des résultats sûrs.

La réalité virtuelle s'est fait connaître dans la foulée de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO ou CAD), dans les années 1990. Cependant, les contraintes techniques étaient

1. <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/>

alors plus importantes qu'aujourd'hui. Les capacités de calcul graphique étaient faibles, la résolution des écrans également, la miniaturisation et les technologies de tracking n'étaient pas encore suffisamment avancées, et le concept est quasiment mort dans l'œuf. Ce n'est donc que 20 ans plus tard que les entreprises sont revenues vers la réalité virtuelle, après avoir attendu qu'une maturité suffisante soit atteinte.

Sur le papier, la réalité virtuelle a de solides arguments à faire valoir dans l'industrie. De nombreux dispositifs permettent l'immersion dans un monde tridimensionnel riche, et tous les métiers impliquant du prototypage et des essais peuvent envisager de travailler au virtuel pour multiplier les cycles d'essais tout en économisant du temps et de l'argent. Dans la pratique, si ces technologies ont percé dans quelques cas d'usage, elles ne sont pas encore totalement démocratisées. Les *Proofs Of Concept* sont aujourd'hui encore trop nombreux par rapport aux concrétisations effectives en outils. Les torts sont partagés et la faute incombe autant aux technologies qu'aux hommes et aux institutions, et, plus particulièrement, aux logiciels et processus complexes nécessaires à l'implémentation de ces usages.

Un outil nouveau

Ces dernières années, beaucoup d'outils modernes sont annoncés à grand bruit, vantant des gains de productivité sur des besoins dont on doute parfois de l'existence. La réalité virtuelle souffre aussi de cette réputation particulière. C'est moderne, fun, high-tech, et annoncé comme le futur de l'ingénierie. Cependant, c'est parfois vu comme un gadget incompatible avec les processus industriels.

Ergonomie

L'ergonomie est capitale pour tout outil utilisé à grande échelle. Les chaises sont faites pour minimiser les maux de dos, les ordinateurs ont des claviers taillés pour la frappe, on propose même des formations d'ergonomie de bureau aux collaborateurs. Et la réalité virtuelle manque encore trop souvent d'ergonomie.

- Les dispositifs ne sont pas *user-friendly*. L'outil est censé être transparent et disparaître derrière ses fonctionnalités. Aujourd'hui, les HMDs sont lourds, peu définis, coupent de l'extérieur et donnent la nausée. Les CAVEs nécessitent de porter des lunettes 3D, voire un gant, voire des chaussons pour ne pas abimer le sol.
- Sur le même principe, les temps d'installation sont trop importants. Ce qui devrait se faire en quelques clics demande en fait de se déplacer jusqu'au simulateur, d'avoir préparé la scène à l'avance, d'allumer les dispositifs, etc. Un opérateur est souvent requis pour lancer la simulation.
- Les logiciels ne sont pas compatibles. Chaque cas d'usage nécessite un travail sur la scène, une optimisation des pièces, et de finalement développer un autre logiciel qui automatisent la compatibilité des simulations avec les simulateurs. La promesse de temps gagné, sans les bons logiciels, n'est pas tenue.
- Les logiciels manquent de robustesse. La vitesse des changements qui se font dans ce domaine empêche la maturation complète des logiciels, qui sont souvent mis à jour et difficile à stabiliser. Dans les cas des grosses licences, d'anciennes versions incompatibles avec la VR sont parfois utilisées car les cycles de mises à jour prennent plusieurs années (Exemple : Windows / Direct3D, CATIA / 3Dexperience).

- Les capacités collaboratives sont encore en chantiers, à l'heure où les entreprises encouragent plus que jamais la communication entre et avec les équipes, les domaines transverses, les espaces ouverts.
- Pour finir, comme déjà évoqué, les modalités d'interaction manquent. Souvent peu génériques, elles ne sont pas implémentées dans les logiciels ou bien pas mûres ni pertinentes. L'absence de retour haptique démocratisé a une forte part de responsabilité, et la percée de quelques systèmes d'interaction dans des entreprises serait d'une grande aide.

Robustesse et fidélité

Dans un contexte scientifique, on peut se permettre d'avoir quelques bugs, des outils avant-gardistes et des processus flexibles. Mais les outils utilisés en entreprises ne doivent en aucun cas être des versions *beta* ou d'obscurs *Development Kits* en financement participatif, comme on en trouve tant. L'entreprise requiert un fournisseur solide qui fournisse un produit fini et un support réactif, sur une durée suffisante, et ce n'est pas toujours le cas.

- Pour commencer, l'entreprise manque de processus de validation des outils et logiciels, pour en certifier le bon fonctionnement. Dès lors qu'un problème se pose, les technologies sont directement mises en cause.
- Les outils logiciels sont souvent compliqués à maîtriser, non pas dans l'utilisation globale mais dans la résolution des petits bugs qui dégradent considérablement l'expérience et la viabilité des sessions.
- Les hardwares changent régulièrement, et leur compatibilité n'en est que plus capricieuse. Le *plug & play* n'est pas encore d'actualité.
- La fidélité est compliquée à atteindre, puisque compliquée à définir. Est-ce que l'on souhaite que la voiture ait exactement les mêmes dimensions au réel et au virtuel, ou est-ce que l'on veut que les utilisateurs pensent qu'elle a les mêmes dimensions ? Les notions sont parfois incompatibles.
- Pour finir, il est souvent difficile d'évaluer le *réaliste* et le *fonctionnel*. Si l'un implique parfois l'autre, l'équivalence n'est pas là et il est parfois complexe de produire des simulations réalistes quand des simulations symboliques plus fonctionnelles suffiraient.

Plate-forme logicielle

Les processus informatiques nécessaires à l'industrialisation des use-cases de réalité virtuelle sont un frein important, même si aucune barrière scientifique n'existe.

- Les maquettes requièrent des caractéristiques jusqu'alors inutiles et pas implémentées dans les bases de données. Par exemple, des matériaux photo-réalistes validés pour chaque logiciel sont nécessaires (ils gèrent souvent les matériaux et shaders différemment).
- Les logiciels sont rarement compatibles avec les maquettes numériques qui parcourent la chaîne de conception. Elles doivent souvent être converties, à part dans quelques exceptions comme l'utilisation de middlewares (TechViz²). On peut devoir leur ajouter

2. <https://www.techviz.net/>

des boîtes de collision avant d'interagir avec. Elles sont souvent bien trop lourdes pour du photo-réalisme en temps réel.

- Les différents systèmes de RV sont rarement compatibles entre eux et nécessitent une installation logicielle à part entière. Les simulations ne peuvent que rarement être lancées indifféremment dans un système ou un autre, même de même nature (deux CAVEs par exemple). C'est d'autant plus vrai avec les dispositifs d'interaction.

La plupart de ces problématiques logicielles devraient se résoudre d'elles-mêmes, au fur et à mesure que la réalité virtuelle s'intégrera plus profondément dans les processus de conception.

Autres contraintes

Les entreprises ont, elles aussi, leurs spécificités, structurelles, conjoncturelles, stratégiques ou même culturelles. Notamment du point de vue de la sécurité, il est nécessaire de procéder à des phases de test ou même d'attendre de voir les effets sur le long terme avant des déploiements à grande échelle (porter un écran à 10 centimètres des yeux toute la journée a probablement des conséquences pour l'instant inconnues). Pour continuer sur le thème de la sécurité, tous les systèmes ne sont pas utilisables. On imagine mal les ingénieurs se couvrir d'électrodes pour rentrer dans un simulateur, ou encore s'électrocuter les muscles pour produire un retour haptique, même si c'est parfois envisageable dans un laboratoire. Il y a également de nouvelles contraintes sur la collecte de données : on relève parfois l'écart inter-pupillaire lorsque l'on utilise un CAVE, et tenir un dossier contenant des données morphologique sur tous les employés d'une entreprise nécessitent de prendre quelques dispositions.

Des changements radicaux

L'Histoire se répète

Rappelons-nous l'arrivée des *Graphical User Interface* (GUI) vers le grand public en 1983. Les informaticiens de l'époque, qui utilisaient alors les lignes de commande, ont été nombreux à dire que ça ne prendrait jamais. Aujourd'hui, la victoire de l'interface graphique est sans équivoque et une minorité d'utilisateurs (si ce n'est aucun) n'en utilisent pas. Cela n'empêche pas ce schéma conservateur de se reproduire avec la réalité virtuelle. Beaucoup d'utilisateurs potentiels sont sceptiques, parfois par conviction, parfois après une expérience qui justifie leurs doutes (comme un bug logiciel, ou un opérateur maladroit). La réalité virtuelle consiste parfois à tromper le cerveau, ce qui n'est pas toujours pris sérieusement et d'autant moins lorsque l'on a connaissance des défauts techniques encore non résolus.

Le changement radical qu'apporte la réalité virtuelle, les nouvelles possibilités présentées, mais aussi la résistance à l'effet de mode et la proximité avec le secteur du jeu vidéo, mènent à des avis divergents.

- Une partie des utilisateurs potentiels ne souhaitent pas sortir de sa zone de confort. Les méthodes de travail ont peu évolué depuis l'arrivée de la CAO comme on la connaît aujourd'hui, en 1998, il y a bientôt 20 ans. La réalité virtuelle est sensible à l'état d'esprit de ses utilisateurs, et les mauvaises expériences sont des prophéties auto-réalisatrices.

- D'autres utilisateurs ont fait les frais de systèmes peu performants, de logiciels instables, de démonstrations trop ludiques ou *gadgets*. Ceux-là mettent parfois du temps à revenir sur leur avis précédent, et défendent les processus rodés contre l'utilisation de technologies modernes à tout prix.
- D'un autre côté, l'aspect high-tech, fun et innovant de ces technologies la rend idéale pour des articles, des interviews, du marketing, qui mettent en avant le côté jeune et dynamique de l'entreprise qui les utilise. De l'extérieur, on peut avoir l'impression qu'on l'utilise plus que dans les faits. En pratique, un POC rapidement réalisé n'est pas si facilement concrétisé en une utilisation régulière d'un simulateur par un métier. Toute concrétisation à large échelle nécessite le développement d'un processus bien huilé et son inscription dans un cadre précis. En revanche, les essais convertis le sont pour de bon, et la réalité virtuelle montre son plein potentiel une fois en exploitation.

Ces difficultés doivent être mises en perspective, puisqu'elles sont classiques de l'introduction de nouveaux outils dans l'industrie. Les gains en temps et en flexibilité offerts par le numérique sont tels que le domaine finira par s'imposer, sûrement pas dans tous les métiers mais partout où il sera pertinent. Les logiciels vont mûrir, des solutions robustes vont se dégager et même si 5, 10 ou 15 ans peuvent passer, le futur travaillera avec la réalité virtuelle.

À propos de cette thèse

Acteurs et objectifs

Cette thèse est née d'un partenariat entre Groupe Renault et Arts & Métiers, deux acteurs majeurs de la réalité virtuelle en France.



RENAULT
Passion for life



Groupe Renault a investi des fonds dès 2002 dans ce domaine afin de fournir des espaces de simulation à l'ingénierie virtuelle, sous la forme d'un Centre Technique de Simulation fondé par Andras Kemeny à cette époque. Depuis, le centre s'est équipé de CAVEs parmi les meilleurs au monde et n'a de cesse d'explorer les voies qu'offre les progrès technologiques et la recherche pour la simulation numérique.

Arts & Métiers est également un précurseur du domaine puisque l'Institut Image, entièrement concentré sur des activités de réalité virtuelle, a été fondé dès 1997 à Chalon-Sur-Saône, le berceau de Nicéphore Niepce. Avec des équipements à la pointe, un plateau technique conséquent et des relations étroites avec les industriels, l'équipe de Frédéric Merienne mène des études en profondeur sur les problématiques de réalité virtuelle et sur l'implémentation effective de ces technologies chez des industriels.

Le LiV, Laboratoire d'Immersion Virtuelle, est une entité de mise en commun des moyens et ressources liant l'Institut Image et Groupe Renault. De nombreux projets de recherche

sont nés de ce partenariat, et plus particulièrement des thèses CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) comme celle-ci. En tant qu'école, l'institut forme de nombreux candidats, qui peuvent ensuite profiter des moyens du LiV comme porte d'entrée vers le doctorat. Cette thèse s'est déroulée dans ce cadre.

Objectifs spécifiques – Pour Renault, cette thèse a pour but d'évaluer les méthodes d'interactions haptiques et la faisabilité de leur implémentation dans des simulations. À long terme, la réalité virtuelle risque d'être démocratisée dans de nombreux domaines de l'ingénierie. Une industrie comme Renault se doit d'être en avance sur ses concurrents en adoptant au plus tôt des processus innovants et compétitifs, sous réserve que ceux-ci soient adaptés et performants. Pour l'instant, le manque d'interactions et de connaissances profondes sur les simulations virtuelles bloque certains cas d'usage.

L'institut nourrit des ambitions semblables, leurs partenaires ayant également besoin de toujours plus d'interactivité. De plus, ces recherches s'inscrivent dans la continuité d'études précédentes, sur les systèmes SPIDAR ou sur les gants vibrotactiles notamment.

Méthodologie de travail

Cette thèse a été structurée suivant trois axes principaux.

- La réalisation et l'analyse de l'état de l'art, qui mettent en exergue les verrous potentiels aux interactions telles qu'on les souhaite, et qui recensent et évaluent les solutions qui existent.
- L'identification de type d'usages généralisables qui mettent en jeu les mêmes problématiques (manipulation, exploration, etc.).
- L'étude plus approfondie de l'haptique passive, par l'ajout d'objets transparents, pour traiter le cas d'usage de la simulation d'interfaces hommes-machines en simulation immersive.

Associées à ces axes, on recherche des éléments de réponses à plusieurs questions scientifiques :

- Quelles sont les disparités de performances des différentes modalités haptiques compatibles avec un système immersif ?
- Quels compromis sont nécessaires entre des interactions performantes et un système ergonomique dans un système immersif ?
- Comment maximiser l'accessibilité des systèmes immersifs tout en leur ajoutant des fonctionnalités d'interaction ?

Ces trois questions globales n'ont pas de réponse simple et sont abordées dans cette thèse dans des situations spécifiques. Des questions de recherche plus précises sont énoncées par la suite lors des études dédiées.

DES APPLICATIONS VARIÉES ET SPÉCIFIQUES

Cette section a pour but de recenser quelques cas d'usage d'outils immersifs nécessitant de l'interactivité et de l'haptique. Nous recherchons des cas d'usage pertinents pour le domaine de la conception automobile, afin d'identifier un panel de paramètres clés en relation avec ces cas d'usage. Nous cherchons ainsi à regrouper les cas d'usage en concepts d'interaction, comme l'exploration, l'action, l'atteignabilité, la manipulation, etc.

Successivement, nous étudierons quels systèmes d'affichage et quels dispositifs haptiques se prêtent le plus à chaque cas, en tenant compte de leurs différences détaillées dans le chapitre 4.

Cette liste ne se veut pas exhaustive des usages de la réalité virtuelle dans l'automobile, elle permet cependant d'appréhender différents besoins de façon spécifique et d'identifier des problématiques qui ne se posent peut-être que dans certains cas précis. Naturellement, certaines solutions sont redondantes et plusieurs cas d'usage présentent des problématiques proches.

Les solutions technologiques sont des choix de 2017 qui anticipent certains progrès techniques futurs. Il faut donc évidemment s'attendre, au vu de la vitesse effrénée des progrès technologiques dans le domaine, à ce que ces choix soient totalement revus dans quelques années. Notamment, les casques auront bientôt suffisamment progressé pour venir concurrencer les CAVEs sur certains sujets, alors que leur qualité visuelle est pour l'instant trop basse pour de nombreux usages. Nos choix tiennent compte de progrès futurs, car la problématique du système d'affichage ne se poserait même pas si l'on s'arrêtait à ce qui a existé dans ces seules dernières années. En effet, l'augmentation de la qualité d'images, la maturité des solutions matérielles et la flexibilité ont d'abord été fortement à l'avantage des CAVEs.

Avatars et tracking

Contrairement aux CAVEs, les casques nécessitent la mise en place systématique d'un avatar. La proprioception ne suffit pas et l'utilisateur doit voir son outil ou ses mains pour interagir. L'incrustation de réel dans le virtuel, le "virtuel augmenté", doit avoir un comportement suffisamment fidèle pour créer l'illusion et la tromperie dans le cerveau des sujets. Il requiert donc un tracking performant d'une part, et un agent de gestion de l'avatar d'autre part.

Les systèmes haptiques sont classés dans une hiérarchie simplifiée, explicitée dans le tableau 1.1. À noter que la classe la plus haute, les systèmes kinesthésiques, est rarement compatible avec les CAVEs à cause de son intrusivité.

Rang	Technique	Exemple technologique	Contraintes principales
1	Localisation seule	LeapMotion, A.R.T.	Précision < 1mm
2	Haptique cutanée	CyberTouch	1+Synchro visuo-haptique
3	Haptique kinesthésique	SPIDAR, Virtuouse 6D	2+Intrusivité et efforts
-	Haptique complémentaire et symbolique	Ombres, interréllections, indices d'efforts	Intrusivité

TABLE 1.1 – Techniques haptiques suivant le niveau d'exigence. *L'haptique complémentaire et symbolique n'est pas classée, puisqu'on peut greffer ces méthodes souvent visuelles à n'importe lequel des systèmes précédents.*

Cas d'usage

Plusieurs types de domaines sont représentés :

- **Métiers à fort besoin d'interactivité** – Ergonomie / Architecture / Montage / etc. Ces métiers nécessitent des interactions avec un prototype, historiquement physique. Les technologies digitales et le maquettage 3D ont permis de diminuer le besoin en prototypes, en visualisant des maquettes numériques sur écran 2D puis par le prototypage virtuel. La réalité virtuelle permet d'injecter une maquette numérique en quelques secondes dans un simulateur et d'immerger un sujet à l'intérieur. On lui offre la possibilité de faire son travail sur la maquette en temps réel sans aucun autre coût que celui de l'exploitation du simulateur et le prix initial de ce dernier. L'immersion dans la maquette à l'échelle 1 rend l'outil presque comparable à un prototype physique, et on peut multiplier les prototypes et les retours sur travaux, en méthode agile. Il faut cependant que les ingénieurs aient suffisamment confiance dans les simulateurs pour que leurs décisions leur semblent fiables. La confiance dans la simulation doit évidemment être justifiée par une simulation précise et validée dans ses correspondances au cas réel.
- **Métiers au besoin orienté sur le visuel** – Design / Qualité perçue, etc. Les revues de design ou de qualité perçue mettent surtout en jeu l'aspect visuel de la simulation,

et nécessitent moins d'interactions. Cependant, et particulièrement en qualité perçue, d'autres modalités sensorielles comme le toucher et le son permettraient à d'autres métiers d'utiliser la réalité virtuelle, pour le bruit d'un claquement de porte ou le toucher d'un cuir par exemple.

- **Formation** – L'apprentissage est aussi un des enjeux majeurs. Un simulateur permet de créer de nombreuses situations d'apprentissage différentes au sein d'une même structure, sans plus de matériel ou de logistique. C'est aussi l'outil idéal pour l'enseignement de tâches dangereuses et/ou onéreuses. L'haptique permet d'améliorer l'expérience virtuelle et les qualités, rapidités et efficacités des apprentissages [Adams & Hannaford, 1999]. C'est d'autant plus important que si l'on est trop différent de la réalité et les perceptions trop éloignées du réel, le mimétisme ne fonctionne pas et l'apprentissage est inopérant.
- **Téléopération** – La téléopération est une fonctionnalité attendue pour de nombreux usages d'opérations à haute valeur ajoutée, dans l'automobile comme dans d'autres domaines comme la chirurgie. La téléopération doit permettre d'opérer à distance dans des environnements, qu'ils soient dangereux ou inaccessibles, sans les contraintes qui existeraient si l'opérateur était sur place. Les perceptions sensorielles doivent être correctement représentées, temporellement et spatialement, pour que l'action ne perde pas (ou le moins possible) en précision ou en efficacité. L'haptique a énormément d'impact dans ce domaine, et tout particulièrement la kinesthésie qui met des frontières aux mouvements. La latence a également une importance significative.
- **Outil client** – Communication, vente, configuration, etc. Ces technologies et leur réputation d'innovation sont particulièrement appréciées comme démonstrateurs technologiques et comme outils de présentations. Elles peuvent aussi servir directement au client, pour essayer un véhicule au virtuel, le configurer, et pourquoi pas l'utiliser. Cette thèse se concentre sur l'ingénierie et ses métiers, et on ne donnera donc pas plus de précision sur ce sujet.

Dans la suite de ce chapitre sont présentés quelques cas d'usage dans les domaines décrits ci-dessus, et dont les problématiques sont explicitées. Cette liste, non exhaustive, montre à quel point les opportunités de chantier sont nombreuses. Certains cas d'usage rassemblent des besoins identiques et permettent d'identifier quelques problématiques redondantes ; Le but du chapitre est bien de retrouver les problématiques les plus critiques dans plusieurs cas concrets. Quelques-uns de ces cas d'usages sont d'ores et déjà implémentés, d'autres ne sont encore qu'à l'étude. Les justifications et explications plus fines de ces choix et des informations techniques sont détaillées dans les parties suivantes.

1.1 Ergonomie

L'ergonomie est l'art de rendre les outils et les systèmes adaptés au besoin auquel ils répondent. Dans une voiture, il s'agit notamment d'ergonomie d'Interfaces Homme-Machines (IHM), caractérisée par trois caractéristiques :

- L'ergonomie du visuel, c'est-à-dire comment sont agencés les dispositifs d'interactions (boutons, sliders, molettes), les affordances et la logique de leur usage.
- L'ergonomie haptique, c'est-à-dire la simplicité et le confort de manipulation des interfaces (atteignabilités, efforts, taille des éléments...).
- L'ergonomie globale, c'est-à-dire la pertinence des fonctionnalités, la réponse aux besoins, le lien entre haptique et visuel, l'efficacité de l'interface.

Nous ne parlerons pas dans cette section de l'ergonomie posturale, qui requiert trop d'aspects physique pour être haptiquement simulée (pour le moment), ou de la visibilité, qui ne met en jeu que la vision.

1.1.1 Réglage du rétroviseur.

Paramètre clés : valeur de l'effort kinesthésique, perception des distances (latéral / profondeur). La valeur ajoutée de l'haptique et de la réalité virtuelle est manifeste, grâce aux gains de temps considérables, à la possibilité d'ajuster des paramètres et de tester les résultats en temps réel. Dans ce cas particulier, on peut optimiser l'effort nécessaire à la manipulation du rétroviseur avant de l'évaluer et d'affiner le réglage dans la foulée.

Système d'affichage

Ce cas d'usage peut s'étudier indifféremment dans des CAVEs ou dans des HMDs. Le CAVE a actuellement nos faveurs, pour sa qualité, son ergonomie, et ses interactions plus naturelles avec les mains. Le poids propre du casque est ici un défaut, puisque les utilisateurs déplacent beaucoup leur tête.

Matériel haptique

Le repositionnement du rétroviseur peut être divisé en deux actions.

- **Phase d'exploration.** L'haptique sert à mieux percevoir et appréhender la distance avec le rétroviseur, et à étudier les atteignabilités. Un retour cutané peut suffire. Les problèmes de perception des distances sont ici les principaux obstacles, mais la perception de l'approche doit aussi être bien simulée.
- **Phase de manipulation :** L'haptique ne sert pas seulement à compléter la vue, mais bien à tester si l'effort à fournir par l'utilisateur n'est pas trop important. L'effort développé décroît rapidement lorsque le bras est en bout de course, et c'est pour ce point particulier que l'haptique doit être précise. **Le système à retour d'effort kinesthésique doit être fidèle à la réalité.** Le matériel doit avoir une inertie, un poids propre et des frottements minimaux pour se faire le plus transparent possible. Les systèmes à retour kinesthésiques étant généralement plus intrusifs, un casque est préférable dans cette situation. On envisagera probablement de robotiser un rétroviseur générique et d'en faire un dispositif d'haptique passive, en se gardant la possibilité d'en régler la raideur.

1.1.2 Manipulation de la boîte à gant.

Paramètre clé : perception des distances (latéral / profondeur). La manipulation de la boîte à gants consiste en une action simplifiée de celle du rétroviseur. L'effort à fournir est bien moindre que lors du déplacement des rétroviseurs, et on résume donc ce cas d'usage à une simple exploration et une estimation des distances et atteignabilités.

Systeme d'affichage

On préférera utiliser un CAVE pour la liberté de mouvement que permettent ces systèmes, mais aussi pour la vision qu'ont les utilisateurs de leur propre corps et qui favorise les interactions naturelles à la main. Le poids des casques est ici une forte contrainte, puisque l'utilisateur va bouger et pencher la tête.

Matériel haptique

Pour faire seulement de l'exploration, on peut se permettre d'être un peu moins regardant sur l'aspect kinesthésique. On pourra utiliser des systèmes cutanés, et peut-être utiliser un modèle symbolique de représentation des perceptions haptiques en substitution sensorielle pour avoir quelque chose de plus fonctionnel même si l'on perd en réalisme. Le système ne doit pas être trop lourd, puisque les explorations sont parfois à bout de bras.

1.1.3 Perception des volumes intérieurs

Paramètre clé : perception des distances (latéral / hauteur / profondeur). Ce cas d'usage consiste encore principalement à de l'exploration. Il s'agit cette fois, grâce à l'haptique, d'améliorer la perception de l'intérieur du véhicule et de ses dimensions. Les efforts sont assez faibles et ne mettent en jeu aucune manipulation ; les utilisateurs doivent cependant pouvoir explorer tout leur environnement alentour, et notamment le plafond et les portières, pour en estimer l'habitabilité ou l'agrément des dimensions.

Cette utilisation très concrète pour le métier de l'ergonomie pourrait être mise en place dès aujourd'hui. Les technologies sont prêtes et, si des produits futurs pourraient être plus performants, on peut dès à présent concevoir un système fonctionnel.

Systeme d'affichage

Dans l'optique d'avoir un cas d'usage fonctionnel en 2017, seul un CAVE doté d'une qualité d'image suffisante est envisageable et peut atteindre les exigences visuelles des utilisateurs. La possibilité d'interactions à la main joue aussi en faveur des CAVEs. À nouveau, un casque fera peut-être l'affaire dans un futur proche, mais ils gardent pour l'instant une définition trop basse, une ergonomie trop faible et une fidélité trop méconnue.

Matériel haptique

Une exploration des distances, par tâtonnements, ne nécessite pas de contraintes d'efforts importantes. Ne pas empêcher la pénétration n'est pas non plus forcément un problème, puisque le repère de distance / profondeur supplémentaire est bien là. Nous préférons sans doute réserver ce cas d'usage au gant vibrotactile adéquat, sous réserve de performances suffisantes et après des tests qui confirment que le système haptique est le bon. De simples modalités de substitution sensorielle sont une autre solution, sous réserve de substituts complets et intelligemment conçus (indices de contact, de pénétration, couleurs, et.).

1.1.4 Atteignabilités du coffre.

Paramètre clé : perception des distances (profondeur / hauteur). Pour des tests en ergonomie du coffre arrière, l'exploration se différencie par la nécessité d'une perception en hauteur des éléments, tout en prenant appui sur d'autres éléments.

Système d'affichage

Dans cette situation où il risque d'y avoir des mouvements de tête de grande amplitude, les HMDs vont poser le problème de leur poids propre. Dans le cas où l'on utiliserait un casque, ce serait probablement une prochaine génération moins lourde et sans fil. Un CAVE ne poserait pas de souci particulier.

Matériel haptique

Encore une fois, l'idéal serait d'avoir un rendu kinesthésique : les ergonomes vont vouloir se pencher en avant et s'appuyer de tout leur poids sur le véhicule de façon à tester l'accès du fond du coffre. Malheureusement, aucun système haptique ne peut rendre un tel retour d'effort. Il faudrait construire un simulateur dédié, comportant des parties physiques mobiles et pilotées, qui s'avèrerait bien onéreux (mais il existe bien un robot claqueur de portières).

1.1.5 Console centrale

Paramètre clé : synchronisation visuo-haptique, interaction naturelle. Il existe plusieurs façons d'appréhender l'ergonomie de la console centrale. On peut tester l'ergonomie globale de l'ensemble, ou seulement celle de l'écran tactile qui centralise de plus en plus de fonctions avec les années.

Ces applications haptiques peuvent être traitées indépendamment de façon à optimiser les scénarios pour chacune. Le matériel haptique n'est pas nécessairement le même.

Système d'affichage

Les mouvements de la tête étant faibles, les casques ne sont pas particulièrement désavantagés. En revanche, les interactions naturelles à la main sont en faveur des CAVEs, à moins d'un système d'avatar suffisamment performant.

Matériel haptique

Localisation des interfaces – En ergonomie, la localisation des interfaces nécessite surtout des contrôles visuels, et l'aspect haptique sert plutôt à confirmer les distances et profondeur des éléments, à tester les atteignabilités. Un gant vibrotactile ou de la substitution sensorielle se prêtent bien à cette tâche.

Utilisation de l'écran tactile – Pour tester l'utilisation de l'écran tactile, il est important de se placer dans une situation quasi-réaliste. La fatigue du bras doit être reproduite fidèlement autant que la performance des sujets en contexte. Pour ce faire, il est préférable d'utiliser un système à rendu kinesthésique, par exemple un dispositif d'haptique passive un profiterait de la planéité du retour d'effort à simuler. Ce cas d'usage fait l'objet d'études plus détaillées dans les chapitres suivants.

1.2 Architecture intérieure

Un véhicule, au-delà de son aspect épuré, est un défi de compacité dans lequel doivent être présents une grande quantité de composants électroniques, câbles, tuyaux et systèmes en tous genres. L'architecture ne doit pas seulement rendre possible la présence de ces pièces, mais aussi leur montage (dans un ordre précis). Il existe donc des simulations de montage qui testent diverses stratégies et qui valident la montabilité des pièces. Qui dit simulation implique évidemment que la réalité virtuelle pourrait être un outil pertinent.

1.2.1 Architecture de la planche de bord

La planche de bord doit composer avec une grande quantité de composants à agencer, tout en respectant des normes de sécurité, des marges de montabilité, et des possibilités de maintenance. La visualisation pointue de ces pièces montées et la simulation des tâches à évaluer est un besoin important.

Systeme d'affichage

La visibilité est le facteur le plus recherché dans cette activité, c'est pourquoi les CAVEs s'y prêtent mieux aujourd'hui. Les mouvements de tête nécessaires aux ajustements du point de vue, pour voir entre les pièces, sont en défaveur des casques. La visibilité y est moins bonne, la qualité visuelle également, et aucun besoin de retour d'effort contraignant n'impose l'usage d'un casque.

Matériel haptique

L'haptique n'est ici que pour les possibilités d'interactions, et non pour un retour d'effort indispensable. La substitution sensorielle ou un gant sont donc tout à fait pertinents pour permettre des interactions naturelles par les opérateurs, si les performances sont au rendez-vous. Une détection des collisions fine serait un plus, avec des nombreux schémas de couleurs en fonction des contacts et des pièces.

1.3 Qualité perçue

L'utilisation des simulateurs de réalité virtuelle est exigeante dans le métier de la qualité perçue tant l'importance du détail et du réalisme est élevée. Afin d'évaluer la qualité d'une perception par la simulation, cette perception et le rendu multisensoriel associé doivent être fidèles. Le visuel est naturellement critique, mais également le son lorsque le cas s'y prête, puis l'haptique et plus particulièrement son aspect cutané s'il y a besoin de ressentir des textures et des matériaux. En qualité perçue particulièrement, si les simulations n'offrent pas des performances satisfaisantes, elles sont inutiles à réaliser.

1.3.1 Ressenti de textures

Paramètre clé : fidélité de la texture.

Systeme d'affichage

Le visuel constitue la première étape et aussi le premier aperçu des textures par l'utilisateur : le grain des matériaux, les rides du cuir, les reflets des plastiques, etc. Le système d'affichage doit donc être particulièrement performant et on préférera utiliser un CAVE ultra-haute définition plutôt qu'un casque de plus basse résolution. Cependant, les casques

permettent l'utilisation de matériels haptiques plus pertinents, et restent un compromis probable.

Matériel haptique

Le ressenti des matériaux peut se faire par de nombreux dispositifs cutanés, même si l'ajout d'une composante kinesthésique est bénéfique. Parmi les systèmes cutanés, on pense aux systèmes suivants.

- Les systèmes à ultrasons, chers, peu connus et dont la fidélité n'est encore que peu évaluée.
- Les systèmes vibrotactiles, plus éprouvés, qui reproduisent mieux les impacts et les clics que les perceptions continues. La faible résolution spatiale de la peau permet de transformer les vibrations localisées en une forme continue.
- Les stimulus nerveux, intrusifs à l'extrême mais qui permettent de différencier les textures.
- Les systèmes à fluide rhéologiques, contraignants dans leur utilisation (surtout par la durée de refroidissement).
- Les systèmes passifs, qui interposent un objet au bon endroit dans l'environnement.

Ce cas d'usage fait aujourd'hui l'objet d'études plus poussées, dans le cadre de projets R&D orientés sur la digitalisation du matériau, ou encore par le partenariat actuel entre Renault et Clarté³ qui a donné vie au robot LobbyBot (figure 1.1), qui, en associant des algorithmes de suivi de la main et un système de changement d'outil, permet d'interposer la bonne texture au bon moment devant les doigts de l'utilisateur.



FIGURE 1.1 – Le robot lobbybot utilisé avec un HTC Vive. Sur ce premier prototype, le système de changement d'outil permet de proposer une dizaine de matériaux différents.

3. <http://www.usine-digitale.fr/article/toucher-des-objets-dans-un-monde-virtuel-renault-et-clarte-y-travaillent-avec-un-robot-collaboratif.N584373> (ou goo.gl/hBczbC)

1.4 Apprentissage

1.4.1 Montage virtuel

Paramètre clé : Précision de l'interaction, intuitivité et interaction naturelle. Que ce soit dans l'automobile, l'aéronautique, le spatial ou même la médecine, les nouveaux exécutants nécessitent une formation en situation que l'on peut offrir à coût et risques moindres. Les capacités d'interactions des systèmes participent à la qualité du processus d'apprentissage.

Système d'affichage

Pour être développé à grande échelle, un tel produit doit posséder un système d'affichage robuste. On peut considérer des systèmes peu chers, polyvalents, flexibles dans leur utilisation et portables pour les formations de masse, pour lesquelles les casques sont alors un bon choix. Pour les formations spécialisées, à forte valeur ajoutée, l'utilisation de CAVEs plus performants est envisageable, car le prix et la simplicité des protocoles est moins prépondérant.

En résumé, deux sortes de situations s'offrent à nous :

- Les apprentissages simples, à diffuser à beaucoup d'opérateurs, se destinent plutôt à des systèmes d'affichage peu onéreux, comme des casques.
- Les apprentissages plus complexes, proposés de façon plus ponctuel et à des opérateurs plus qualifiés, préféreront sans doute l'utilisation de CAVEs.

Les nécessités en matière de dispositifs haptiques influencent aussi le choix du système visuel.

Matériel haptique

Le vrai défi se révèle dans le choix du matériel haptique. L'usage d'un HMD permet de diminuer significativement l'intrusion visuelle des systèmes et permet plus de choix que dans un CAVE. Toutes sortes de bras haptiques (type Haption Virtuose 6D) ou d'exosquelettes (type CyberForce) peuvent être utilisés dans un CAVE sans crainte du côté invasif, seul leur prix reste une barrière. Des systèmes plus modestes, par exemple vibrotactiles, sont une solution plus flexibles pour les structures à peu de moyens et pour des situations plus simples à simuler.

Réalité augmentée

Des systèmes de RA (type HoloLens en 2016) peuvent s'avérer plus pertinents pour ces tâches. Ils peuvent permettre à l'utilisateur de procéder à sa tâche tout en ayant quelques aides et consignes graphiquement ajoutés à son environnement réel. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'équiper la simulation en rendu haptique ni en interactions, puisque l'utilisateur exécute sa tâche normalement.

1.4.2 Maintenance virtuelle

Paramètre clé : Précision de l'interaction, intuitivité et interaction naturelle.

La formation virtuelle à la maintenance possède en grande partie les mêmes contraintes que la précédente. Le but recherché est l'enseignement de tâches manuelles, avec ou sans outil, et d'apprendre autant les mouvements à effectuer que la disposition des autres éléments ou

les étapes successives de démontage. La RA est encore plus pertinente que précédemment, et plus seulement en formation mais toute la journée.

1.5 Téléopération

La téléopération est un défi majeur pour beaucoup d'industries, et l'automobile n'y fait pas défaut. Pour qu'une téléopération soit aussi performante qu'une opération réelle, plusieurs critères doivent être remplis.

- Un bon rendu des perceptions.
 - Un champ de vision égal ou supérieur à celui du réel.
 - Un retour d'effort performant qui rende efficacement les perceptions haptique extérieurs à l'utilisateur.
 - Un système de son spatialisé fidèle, potentiellement complété d'indices supplémentaires.
 - Quand cela s'y prête, une reproduction des autres sens (odeurs, vent...).
- Une latence suffisamment basse
- Un système de reproduction des mouvements de l'utilisateur qui soit fidèle, voire qui en augmente l'efficacité et les possibilités.

Cette étude concerne le retour d'effort, lié aux autres systèmes (vision, son) par les contraintes qu'ils imposent.

1.5.1 Montage

Paramètre clé : Précision de l'interaction, intuitivité. Les opérations de montage représentent une télé-opération basique et large. Le but est de permettre à l'opérateur d'effectuer son opération efficacement et à distance : On doit, au possible, atteindre les mêmes performances que lors d'un montage classique pour la rapidité, la fiabilité, la précision, la répétabilité et la pénibilité.

Système d'affichage

Si l'on présume que la téléopération va se généraliser, il faut considérer que les systèmes doivent répondre aux mêmes besoins que tous les outils technologiques récemment généralisés à grande échelle : prix, mobilité, accessibilité, ouverture sur les technologies déjà présentes. Ce sont les HMDs qui semblent ici les systèmes les plus adaptés, et qui le seront d'autant plus dans les années qui viennent avec les progrès technologiques prochains.

Matériel haptique

Toujours dans cette optique de large généralisation (et donc de compacité, d'accessibilité et de portabilité des dispositifs), tout système haptique trop lourd se prêtera seulement à certaines opérations précises. La majorité des téléopérations plus simple ne nécessitent qu'un système haptique plus modeste, vibrotactile par exemple, mais aucun système ne peut réellement être retenu ici : Les cas d'usage sont trop variés. Exosquelette, gant, bras haptique, etc., chaque système trouve son client, y compris pour les opérations plus fines nécessitant des performances supérieures, parfois au prix d'un des critères (la portabilité n'est pas toujours indispensable). L'important est d'adapter la modalité d'interaction au cas d'usage et au besoin en valeur ajoutée.

1.5.2 Téléopération collaborative

Paramètre clé : cohérence de la collaboration.

L'exécution collaborative de tâches en téléopération présente son lot de défis. Les temps de latences sont encore plus importants dès lors que les signaux traversent plusieurs fois les systèmes pour lier les actions de chaque collaborateur à des distances importantes.

Les éléments fondamentaux d'une collaboration sont la transmission de l'avatar, de la voix et d'un pointeur pour chacun des collaborateurs. Une fois que tous ces éléments transitent librement entre les différents systèmes VR qui font partie de la simulation, tout se passe comme s'il s'agissait d'une téléopération classique.

On différenciera collaboration et coopération. Dans la seconde notion, les sujets agissent chacun de leur côté pour un but commun et voient les actions des autres contribuer à ce but. En collaboration, les sujets interagissent entre eux et travaillent ensemble. La latence doit être encore plus faible car les données font l'aller-retour, mais il n'y a pas de contraintes particulières sur le système d'affichage ou le matériel haptique. Le concept de téléopération collaborative étant peu spécifique, les métiers qui s'en serviront sont variés et ont chacun des besoins différents.

Généralisation

Comme prévu, de nombreux cas d'usage présentent les mêmes problématiques, dont on peut généraliser les sources à certains besoins.

- **Les CAVEs** sont à leur avantage lorsque des interactions naturelles, à la main, sont recherchées. On les préfère également pour les simulations ne mettant en jeu que de la visualisation. Pour finir, on préfère les CAVEs dans les situations de mouvements, où le poids des casques est un défaut.
- **Les HMDs** sont d'abord préférés lorsqu'un système plus abordable ou portable est nécessaire. Par défaut, on les utilisera également lorsque le besoin d'un système haptique kinesthésique est exprimé, puisque les CAVEs sont incompatibles avec les dispositifs intrusifs. Enfin, Les HMDs sont mieux adaptés au collaboratif, et surtout les casques de réalité augmentée très attendus dans les années à venir.

CHAPITRE 2

PROCESSUS D'INTERACTION

Cette partie traite des mécanismes de la perception du toucher. Ils ne se limitent pas toujours aux processus purement haptiques, c'est-à-dire cutanés ou kinesthésiques. On s'intéresse aussi aux divers compléments sensoriels qui contribuent à une interaction.

Un processus de toucher ne peut pas être décrit comme une simple chaîne unidirectionnelle de protocoles qui se suivent bouts à bouts. Contrairement à la perception visuelle, le toucher n'est pas exclusivement passif ni actif : il s'agit d'une boucle d'actions et de rétroactions sur les mouvements de l'utilisateur, en temps réel (figure 2.1). L'utilisateur agit sur la simulation et la simulation agit sur l'utilisateur.

Du point de vue de l'utilisateur, un stimulus haptique active la perception et fait remonter l'information au cerveau, de manière à commander l'application d'efforts. C'est la perception physiologique, que l'on complète par d'autres sens non haptiques comme la vue ou l'ouïe et qui permettent de confirmer et préciser les informations. La psychologie des usagers a aussi son importance tout au long du processus.

Dès lors que l'on souhaite ajouter un système de retour haptique artificiel, on doit produire un rendu haptique sur le même schéma que précédemment, et donc reproduire les mêmes étapes artificiellement. Le rendu virtuel haptique commence par une détection fine de l'espace et des collisions, dont les efforts sont ensuite déduits. L'algorithme haptique se charge de produire les réponses, et celles-ci sont transmises aux éléments qui agissent directement sur le corps et la perception du sujet, de manière à recommencer la boucle. Ces étapes sont détaillées dans la partie 2.3.

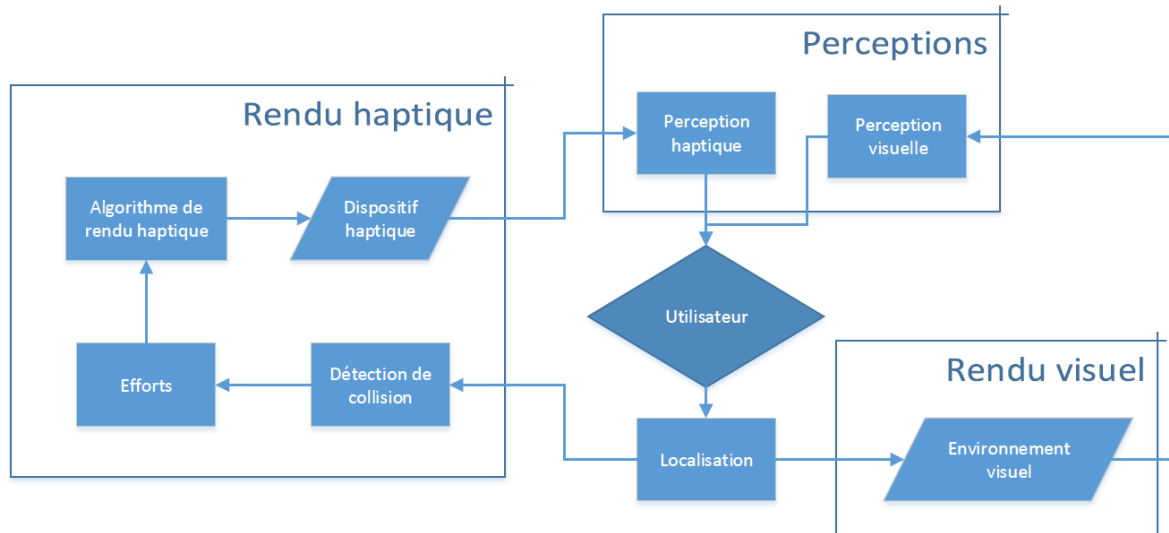


FIGURE 2.1 – La boucle Action-Perception-Sensation, centrée sur l'haptique.

2.1 Mécanismes de perception du toucher

La connaissance du processus physiologique lié aux phénomènes haptiques est un savoir de longue date. En effet, la perception du toucher est omniprésente et l'une des plus développées chez l'homme, avec la vue et l'ouïe, et a beaucoup été étudiée en conséquence. Le toucher est puissant car il peut reconnaître des formes, textures, températures, douleur ou encore plaisir, et ce sur tout le corps : la peau est le plus grand organe de l'être humain [Moore *et al.*, 2013]. On distingue deux perceptions distinctes en haptique, mettant en jeu des récepteurs différents :

- **La perception cutanée**, liée à la peau.
- **La perception kinesthésique** (ou proprioceptive), liée aux tendons, aux muscles et aux os.

Ces deux perceptions sont pondérées différemment par le cerveau en fonction du contexte et des tâches à réaliser [Lederman & Klatzky, 2009] ; la priorité sera parfois donnée à la perception cutanée ou parfois à la kinesthésie pour la collecte des informations de l'environnement extérieur.

À ces deux types de perceptions s'ajoutent toutes les informations acquises par les autres sens, et notamment par la vue, traitées dans la section 2.2.

2.1.1 La perception cutanée

Dans la suite et pour tous les chiffres donnés, on s'intéressera particulièrement à la main à titre d'exemple. Le principe est le même sur le reste du corps, même si quelques caractéristiques (comme la densité de mécano-récepteurs) peut varier.

La perception cutanée désigne le toucher au sens auquel on l'entend habituellement : la perception des textures, des pressions, des vibrations, etc. Elle peut s'exercer n'importe où sur le corps, dès lors qu'il y a de la peau, ce qui en fait un sens assez robuste mais tout de même sensible à quelques éléments extérieurs comme la température ou tout simplement

l'âge du sujet [Provins & Morton, 1960]. C'est une des 4 modalités de la sensibilité somatique, avec la douleur, la température et la kinesthésie.

Pour détecter des stimuli, le système nerveux périphérique possède, en plus des terminaisons nerveuses classiques, de nombreux récepteurs dans la peau [Johansson, 1978]. Ceux-ci sont responsables de rendre au mieux tous types de sensations du toucher, indépendamment des fréquences, intensités, localisations, directions et durées. Ils sont présents sous la peau en densité plus ou moins importante selon les localisations, et influent sur la sensibilité des zones : les bouts des doigts et la paume sont par exemple extrêmement sensibles aux touchers. Les zones glabres sont de manière générale plus perceptives au toucher que les zones poilues, qui possèdent d'ailleurs des récepteurs différents.

Détection des stimuli – Chaque récepteur possède un seuil de détection des stimuli. Dès lors qu'un stimulus atteint ou dépasse le seuil du récepteur qui lui correspond, il est converti en un potentiel d'action par la transduction sensorielle. L'information est ensuite transmise via la voie lemniscale vers le thalamus, puis vers le cortex somatosensoriel qui se charge de la traiter [Seow, 1988]. On estime que le seuil de détection globale (*Just Noticeable Value* ou *JNV*) de l'ensemble du système cutané est de 0.06 à 0.2 *Newtons/cm²*, et de 5 à 355 grammes pour la pression [Hale & Stanney, 2004].

La résolution spatiale du toucher varie énormément suivant les zones stimulées, avec la meilleure résolution au bout des doigts et la plus basse dans le dos [Lederman & Klatzky, 2009]. En fonction des tests, on trouve ensuite des résolutions spatiales légèrement variables :

- Un à deux millimètres pour un stimulus exercé deux fois successivement, en demandant au sujet s'il l'a perçu au même endroit ou non.
- Deux à quatre millimètres, lors de la détection de l'horizontalité ou de la verticalité d'une petite barre.

La résolution temporelle du toucher cutané est excellente, puisqu'elle atteint les 5ms, même s'il faut 20ms pour pouvoir ordonner les évènements [Burdea, 1996; Burdea & Coiffet, 1993].

Adaptation temporelle – Chaque récepteur s'adapte temporellement à l'environnement extérieur en décroissant graduellement l'intensité de sa réponse après l'application du stimulus. Ils se comportent comme des filtres de fréquences. Grâce à ce phénomène, on peut ignorer les touchers continus comme le port d'habits ou de gants. Nous verrons dans le paragraphe suivant que les mécano-récepteurs se répertorient notamment par leur temps d'adaptation.

Classification –

- Les récepteurs de type SA (*Slowly Adapting*) sont les plus lents. Ils donnent des indications d'intensité, de durée ou de direction des efforts. Ils se comportent comme des passe-bas.
- Les récepteurs de type RA (*Rapidly Adapting*) sont les plus rapides et indiquent plutôt des changements brusques de la perception. Ils se comportent comme des passe-haut.
- Les récepteurs de type I ont la tâche de traduire les stimuli proches de la surface de la peau, ce avec une précision spatiale aigüe. Ils sont suffisamment petits et densément

répartis pour remplir ce rôle, mais leur capacité de résolution varie beaucoup d'un individu à un autre. Ils ne sont présents que dans la peau glabre (sur les mains, par exemple) [Hale & Stanney, 2004].

- Les récepteurs de type II, plus gros, plus profonds, détectent la direction, l'intensité et les changements des stimuli situés plus profonds dans la peau, au point de contribuer à la proprioception.

Reconnaissance de forme – Dans des phases d'exploration ou de manipulation dans lesquelles on a besoin de reconnaissance de forme, les récepteurs SA se chargent de fournir une perception large et grossière de l'objet tandis que les récepteurs RA repèrent les détails plus fins et plus aigus.

Mécano-récepteurs

Il existe quatre types de mécano-récepteurs dans les zones glabres, 3 seulement en présence de poils (voir figure 2.2). Les informations données dans la suite de ce paragraphe sont résumées et quantifiées dans le tableau 2.1. *Sources : Burdea [1996]; Johansson [1978]; Raisamo [2009].*

1. **Les corpuscules de Meissner (RA I)** sont situés presque en surface, immédiatement sous l'épiderme, et représentent environ 40% des récepteurs de la main. Ils sont les plus sensibles au tact, aux pressions légères et aux déformations locales. Ils réagissent rapidement et ont une résolution spatiale fine. Ils ne sont présents que dans les zones glabres.
2. **Les corpuscules de Pacini (RA II)** sont encore plus rapides que les précédents. Plus grands, moins nombreux (environ 13%) et beaucoup plus profonds, Ils réagissent aux très hautes fréquences : de 80Hz à 400Hz, pour des sensations optimales entre 200Hz et 250Hz. Ils ne détectent que les variations des stimuli et non leur composante continue, et ils ne perçoivent donc que le début et la fin de chaque sensation. Ils ont une résolution spatiale plus basse du fait de leur taille.
3. **Les disques de Merkel (SA I)** sont à adaptation plus lente et irrégulière. Pour des fréquences de 0 à 30Hz, ils repèrent l'intensité et la durée de la pression, la position et la vitesse du stimulus. Ils peuvent fournir des informations sur les vibrations, la forme et la texture, la courbure de la peau, et représentent 25% des récepteurs.
4. **Les corpuscules de Ruffini (SA II)** sont à adaptation lente, mais régulière. Ils sont particulièrement efficaces pour repérer l'intensité et la direction des efforts, les étirements et cisaillements. Ils se chargent aussi de percevoir les variations de la température. Leur résolution spatiale est plus basse et ils sont légèrement moins nombreux (19%).
5. **Les récepteurs des follicules pileux** ne sont présents que dans les zones poilues, à la base des poils. Ils repèrent les mouvements de ceux-ci.

Sont également présentes dans la peau des terminaisons nerveuses libres, mais elles ne répondent qu'à la douleur et à la température : ce sont des nocicepteurs et des thermorécepteurs.

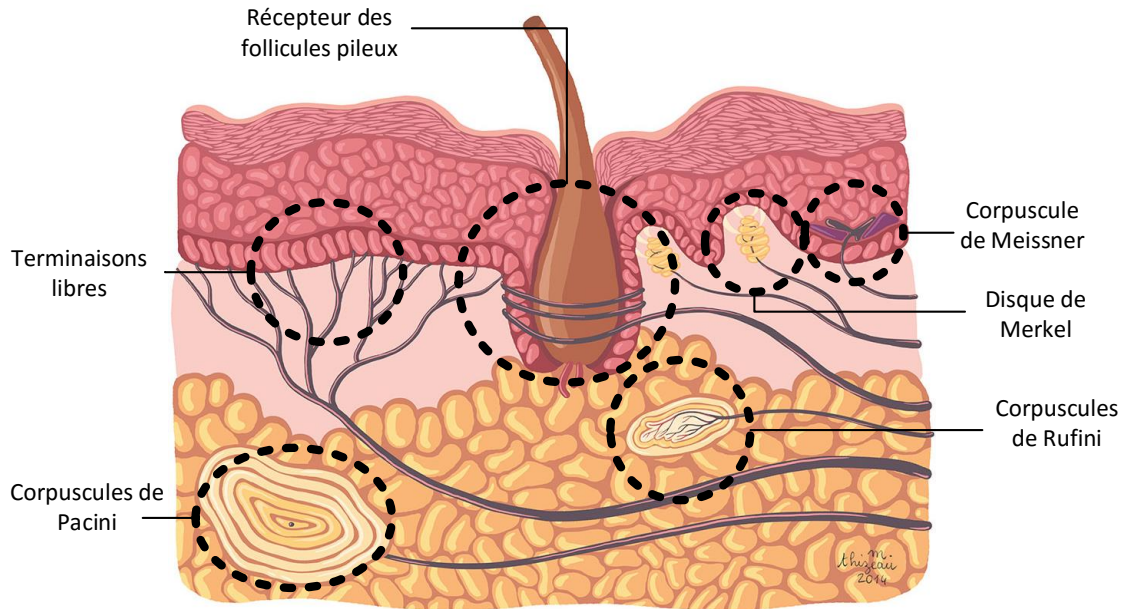


FIGURE 2.2 – Les mécano-récepteurs présents dans la peau. CHU Pitié-Salpêtrière ©

Récepteurs Spécs	Corpuscules de Meissner	Corpuscules de Pacini	Disques de Merkel	Corpuscules de Ruffini
Type d'adaptation	RA I	RA II	SA I	SA II
Taille du récepteur	3 à 5mm	Plusieurs cm	2 à 3mm	1 à 2.5cm
Densité	40%	16%	25%	19%
Intervalle de fréquence	2 à 40Hz	80 à 400Hz	Jusqu'à 30Hz	Jusqu'à 15Hz
Fonction principale	Basses fréq. Déform. locales	Hautes fréq. Début et fin	Intensité, Durées, formes	Étirements et cisaillements

TABLE 2.1 – Les mécano-récepteurs des zones glabres de la peau.

2.1.2 La contrainte kinesthésique

La kinesthésie désigne la perception, consciente ou non, de la position des différentes parties du corps, et des efforts qui s'y appliquent (Wikipédia). La contrainte kinesthésique (ou proprioceptive), même si elle ne semble pas concerner le sens du toucher au premier abord, a son rôle dans les processus haptiques.

Avant tout toucher, il y a mouvement. C'est grâce à la kinesthésie que se fait toute l'approche précédent le toucher [Robles-De-La-Torre, 2006], sa justesse, sa vitesse, et qu'un retour d'effort tangible est ressenti par les muscles, les tendons, les articulations et le corps tout entier lorsqu'un toucher a lieu. C'est la kinesthésie qui permet le contrôle fin de ses propres mouvements, la stabilité et la précision des actions. Les contraintes kinesthésiques de l'environnement extérieur, qui permettent de contraindre les mouvements de l'humain, libèrent le cerveau de ce rôle et permettent des mouvements rapides et précis sans s'encombrer de réflexion. Les systèmes exclusivement cutanés souffrent beaucoup et de la possibilité de pénétrer la matière à cause du manque de contraintes kinesthésiques.

La kinesthésie joue aussi un rôle dans l'évaluation des formes des objets. Les sujets sont plus ou moins incapables de tâtonner une surface sans un système à contrainte kinesthésique [Martinez *et al.*, 2016] tant la rétroaction exercée par celle-ci facilite le processus.

Perception kinesthésique – Pour acquérir la perception que chacun a de la localisation et du mouvement de son propre corps et de ses membres, la kinesthésie (plus souvent appelée proprioception dans ce cas précis) utilise 3 mécano-récepteurs internes, les propriocepteurs. Ils mesurent la sensibilité musculaire, les angles des articulations, les efforts extérieurs. De la même manière que lors d'un toucher cutané, les récepteurs transmettent leurs informations par la voie lemniscale vers le cortex cérébrale, qui obtient une vision proprioceptive du corps.

Active ou passive – Les processus cérébraux sont légèrement différents entre les situations de touchers actifs, les actions effectuées par le sujet, et les situations de touchers passifs lors desquels le sujet est touché par un élément extérieur. Si les recherches les plus anciennes relevaient les mêmes activations cérébrales pour des touchers actifs et passifs, d'autres ont plus récemment prouvé via des procédés plus précis que le toucher passif activait plus faiblement le cerveau, tant en intensité qu'en terme de zones et de surface [Mima, 1999]. D'une manière générale, les sujets sont plus attentifs lors de touchers actifs, et les touchers passifs n'actionnent pas les cortex prémoteur et sensorimoteur notamment. On estime que les touchers actifs actionnent prioritairement la kinesthésie, tandis que les touchers passifs concernent plutôt la perception cutanée [Mavor *et al.*, 1994]. Il résulte de tout cela une meilleure précision de la proprioception lors de touchers actifs plutôt que passifs [Craske & Crawshaw, 1975].

Non pénétration – Sans contrainte kinesthésique tangible exercée par l'extérieur, l'humain doit arrêter ses mouvements tout seul lorsqu'il touche des objets. Il doit pour cela s'appuyer sur d'autres indices de localisation, par exemple visuels, au lieu d'un simple blocage passif, et il surcharge sa cognition à cette tâche [Petzold *et al.*, 2004].

Mécano-récepteurs

La kinesthésie met en jeu des récepteurs chargés de détecter la position, le mouvement, mais aussi les efforts [Burdea, 1996].

- Comme dans la peau, on trouve des corpuscules de Ruffini et de Pacini, de types respectifs SA II et RA II. Ceux-ci sont logés dans les articulations, subissent continuellement les pressions du corps et en déduisent les positions angulaires des articulations. Les variations de pression fournissent également au cerveau des informations sur la vitesse du mouvement.
- On trouve des fuseaux neuromusculaires dans la fibre des muscles. Ceux-ci sont excités par les étirements des fibres musculaires et en déduisent une valeur de position fonction de la longueur courante du muscle.
- Les organes tendineux de Golgi se situent entre les tendons et les muscles et mesurent l'effort de contraction de ceux-ci. Ils permettent de réguler les contractions simultanées des muscles et d'affiner considérablement le contrôle moteur du corps.

Une information d'effort supplémentaire vient de la fatigue musculaire, y compris à effort constant, qui donne des indices proprioceptifs de la position des membres en fonction des muscles qui travaillent.

Pour finir, les mécano-récepteurs de la peau jouent aussi un rôle, et plus particulièrement les récepteurs de type II (corpuscules de Pacini et Ruffini) qui détectent les étirements, cisaillements et déformations plus générales de la peau. Ces informations complètent les autres données proprioceptives pour préciser la perception [Collins, 2005].

Précision kinesthésique

En réalité virtuelle, les sens sont souvent dupés. Notamment, l'oreille interne et la vision sont des exemples classiques de tromperie sensorielle.

- Les systèmes de vision n'ont pas besoin d'afficher plus de pixels que ce que peuvent percevoir les yeux.
- Les simulateur dynamiques peuvent se replacer avec des accélérations suffisamment faibles pour être indétectables par l'oreille interne.

Il est donc important de connaître la précision kinesthésique avant de concevoir et d'optimiser les systèmes, puisque c'est elle qui pose les frontières technologiques auxquelles on se heurte et qu'il suffit de surpasser pour être réaliste. On parle de JND (Just Noticeable Difference) pour décrire à partir de quel écart il y a différence de perception. Les JND de la kinesthésie ont été étudiées par le passé [Tan *et al.*, 1994] :

- La JND kinesthésique pour de lentes variations d'efforts est de 7%.
- Pour des efforts moyens (Au centre de l'intervalle des efforts contrôlés), la résolution maximale des efforts est de 0,36 newtons, un peu plus faible dans les poignets que dans les épaules.
- Pour les angles des articulations, le JND est assez variable. Peu précis au niveau des orteils, il l'est plus au niveau de l'épaule ou du poignet (jusqu'à 0.8 degrés à l'épaule).

En première lecture, la kinesthésie n'est pas extrêmement précise. Les angles des articulations ont une imprécision particulièrement conséquente, ce qui cause une erreur encore plus grande en bout de chaîne : dans le cas de l'avant-bras, deux degrés d'imprécision au niveau du coude engendrent une déviation latérale d'un centimètre au niveau du poignet, ce pour un avant-bras de 30 centimètres. Des études ont déterminé une erreur de 3 à 10 centimètres pour la chaîne complète jusqu'au doigt [Fuentes & Bastian, 2010].

Pour s'en convaincre, il suffit de fermer les yeux, de tendre les bras le long du corps et de les remonter pour se faire se toucher les deux index au-dessus de la tête. Rares sont ceux qui y parviennent du premier coup.

Amélioration de la précision – Les effets d'apprentissage peuvent en revanche changer radicalement la finesse kinesthésique, et l'homme peut reproduire des mouvements et des positionnements précisément après suffisamment de pratique (on pense évidemment aux sports qui mettent en jeu des mouvements millimétrés et une répétabilité exceptionnelle). C'est grâce à ses grandes capacités d'apprentissage que l'Homme peut écrire, marcher ou plus généralement travailler, malgré sa faible précision kinesthésique initiale.

2.1.3 Aspects psychologiques et fluctuations

Les mécanismes qui régissent la perception de l'Homme ne sont pas une science exacte. L'appréciation des événements se fait suivant l'expérience, la fatigue, ou même l'humeur du jour, qui influencent même la traduction des informations sensorielles par le cerveau. En réalité virtuelle, les sujets n'ont qu'une confiance assez limitée dans leur sens qu'ils savent trompés et cela peut dégrader fortement l'expérience des simulations.

Perception subjective

On peut imaginer une expérience de pensée dans laquelle on compare le réel et le virtuel, en exploitant leurs aberrations dans les deux cas, et en adoptant un point de vue positif ou négatif.

- Dans le réel, les aberrations sensorielles sont mises sur le compte d'illusions originales, de fatigue ou d'imprécision sensorielle. Les perceptions sont parfois imparfaites, mais éprouvées. On ne remet pas le monde en cause mais plutôt soi-même.
- En virtuel, il devient possible d'accuser les systèmes de rendu, visuels par exemple, au lieu de se remettre soi-même en question. Les sujets préfèrent naturellement penser que c'est le système qui fonctionne mal plutôt que leur perception.

Cet effet est accentué par la quantité d'imprécisions des simulateurs actuels qui peut leur construire une réputation peu flatteuse aux yeux des sujets. Malheureusement, une fois ce préjugé profondément ancré, l'appréhension des utilisateurs se rend responsable d'une forte chute de la présence, voire de nouvelles imprécisions dues à une mauvaise interprétation du cerveau, et un avis négatif se transforme en prophétie auto-réalisatrice. Il ne s'agit pas de mauvaise foi de la part du sujet, mais bien d'une interprétation inconsciente et différente du cerveau qui se base sur un contexte présent et passé. La priorité sensorielle peut s'inverser, les variances attribuées aux perceptions deviennent irrégulières, et il est difficile pour ces raisons de créer un comportement qui soit identique face à chaque sujet.

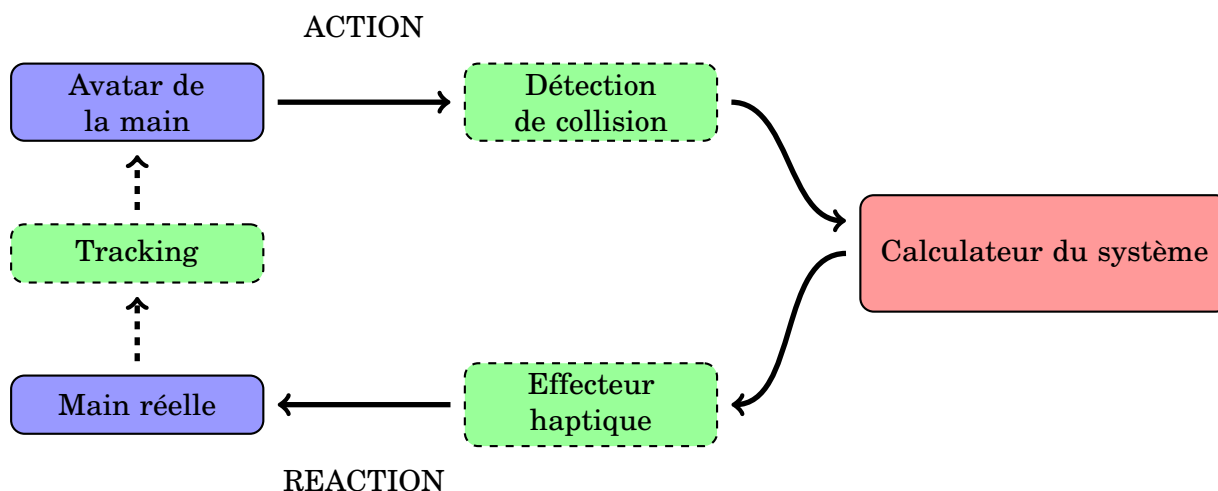


FIGURE 2.3 – La division de l'interaction entre la main et son avatar. *C'est l'avatar qui agit sur le système par l'intermédiaire du tracking, puis le système réagit sur le réel. Le tracking, idéalement, confond totalement l'objet et son avatar pour un schéma cause / conséquence classique.*

Illusions

Les développeurs de la réalité virtuelle l'ont bien compris, la production d'une scène théoriquement parfaite n'implique pas que le cerveau y croira. En fait le raisonnement se fait dans l'autre sens : il faut en premier lieu que le cerveau y croit, et trouver pour cela les bons outils. L'outil le plus évident est le réalisme et le rapprochement avec le réel, mais pas seulement et pas nécessairement. En vision et en haptique principalement, de nombreux artifices peuvent permettre de communiquer les informations sensorielles nécessaires. Ces illusions sont omniprésentes autant qu'indispensables en réalité virtuelle. L'exemple le plus évident demeure l'affichage stéréoscopique qui trompe la vergence oculaire des sujets.

En haptique comme en vision, les illusions ont plusieurs rôles [Lederman & Jones, 2011].

- Elles permettent de limiter les performances des systèmes à celles de l'appareil sensoriel humain, et donc de diminuer fortement le prix des simulateurs.
- Elles permettent de mieux cibler les processus cognitifs qui accompagnent la perception.
- À un niveau plus global, elles permettent tout simplement au rendu d'exister. Toute la réalité virtuelle est fondamentalement basée sur de l'illusion.

Le fait d'introduire de l'haptique en virtuel constitue la principale illusion haptique, mais le rendu haptique est plus complexe que le rendu visuel et la tromperie est donc plus complexe à réaliser. L'aspect bidirectionnel de l'haptique sépare l'interaction en actions et réactions, agissant successivement sur l'objet réel ou sur son avatar, comme expliqué figure 2.3 dans le cas de la main (le concept d'avatar est détaillé dans la section 3.4.1). Comme le sujet agit par l'intermédiaire de son avatar, tout l'objectif des illusions réside dans le fait que l'utilisateur est en empathie avec son avatar.

Les illusions haptiques permettent aussi d'aider à la conception des dispositifs haptiques en connaissant les limites qu'ils doivent dépasser et les artifices qu'ils peuvent utiliser. Parmi les illusions haptiques rencontrées, quelques exemples assez classiques :

- Les dispositifs d'haptique symbolique (comme *VibroTac* de la société SensoDrive©), qui peuvent servir à faire croire à un événement à travers une sensation non réaliste mais contenant les bonnes informations.
- Des dispositifs haptiques qui appliquent un retour partiel, comme les chocs sensés être liés aux pas d'un sujet qui marche [Terziman *et al.*, 2012].
- Le remplacement du retour kinesthésique par une métaphore vibrotactile de frottements de façon à rendre la résistance de matériaux non rigides [Kildal, 2010; Kim & Lee, 2013].

Fluctuation des perceptions

Tant d'illusions, d'imprécisions visuelles et de subjectivité ne permettent pas une perception aussi robuste que dans la réalité [Ernst & Bühlhoff, 2004]. Les perceptions spatiales et kinesthésiques peuvent fluctuer au cours d'une simulation, en fonction des variations de robustesse de la perception, de la qualité des indices visuels, de l'implication du sujet dans la simulation [Wright *et al.*, 2014]. C'est particulièrement vrai pour les perceptions dont le processus d'acquisition nécessite une chaîne d'information plus large, comme la profondeur (qui se base sur la stéréoscopie, les lumières et occultation, l'accommodation, l'expérience) ou la position des membres (qui se base sur la chaîne des articulations dont l'erreur s'accumule). Les fluctuations qui surviennent peuvent poser problème, mais il est aussi possible d'en tirer parti.

2.2 Effets multisensoriels

Afin de maximiser la robustesse de la perception, le cerveau tente d'accumuler le plus d'indices extérieurs possible et via toutes les sources d'information (les perceptions) disponibles [Ernst & Bühlhoff, 2004]. C'est en augmentant la quantité d'information qu'il lui devient possible de juger de la confiance à allouer envers chacune des sources, mais aussi de moyenniser les informations tout en supprimant les aberrations. Cette opération est indispensable, y compris dans le réel : même si un sens faisait 10 acquisitions de la même information, la précision de ces acquisitions et le bruit des communications neuronales rendraient nécessaire le processus de moyennage et lissage.

Pour répondre à des situations ambiguës, le cerveau va cumuler, combiner, compiler et analyser en continu toute l'information à sa disposition. Il attribue une variance à chaque donnée, en fonction de paramètres comme l'expérience ou les conditions de perception [Ernst & Banks, 2002]. Il en déduira une réponse à l'évènement sensoriel. En déficit d'informations ou/et avec trop d'informations contradictoires, des situations surprenantes peuvent se manifester : c'est sur ce principe que sont réalisées les illusions d'optique classiques, jouant souvent sur la profondeur ou l'échelle (figure 2.4). Sans même parler de l'aspect contradictoire des différentes perceptions, le cerveau n'a parfois que peu d'informations pour livrer son jugement, et il en ressort des données imprécises, incomplètes ou erronées.

Dans ce paragraphe, nous étudierons successivement différentes modalités de l'aspect multisensoriel de la perception haptique, afin de découvrir quels sens complètent le toucher et quels défauts ils entraînent, notamment à travers l'apprentissage et les illusions sensorielles.

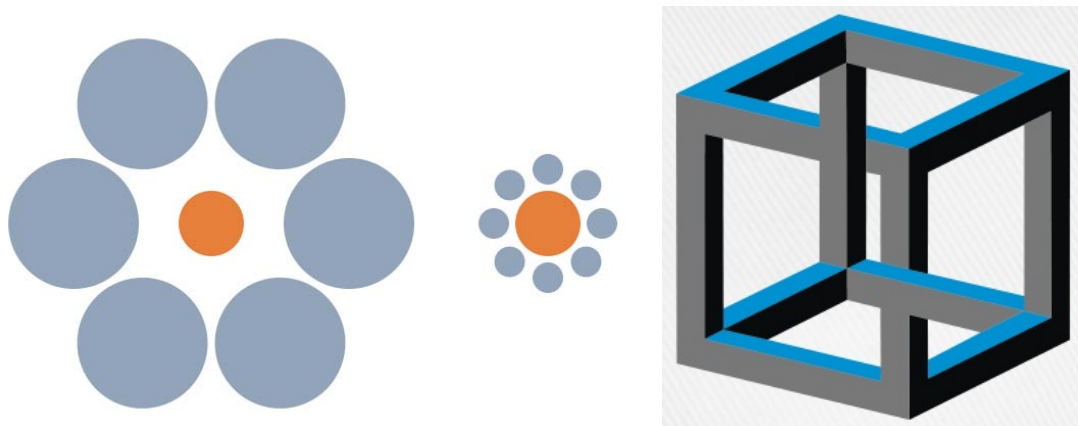


FIGURE 2.4 – Illusion visuelle classique d'échelle et de profondeur.

2.2.1 Profondeur et contact

Synchronisation sensorielle La perception de la profondeur est capitale dans le processus du toucher. Lors de l'évènement du contact, le cerveau reçoit des informations différentes et complémentaires de la part des systèmes de perception :

- Le retour haptique rend compte d'une contrainte kinesthésique et d'un retour cutané. Le changement de perception cutanée s'apparente à un évènement discret, et l'on passe de l'état *non-contact* à l'état *contact* en un instant. La kinesthésie permet l'approche, souvent en coordination avec la vision.
- La vision rend compte de l'approche par l'intermédiaire d'indices visuels comme la stéréoscopie, l'ombre portée ou encore les interréflexions [Chan *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2000]. Le changement de perception est continu et l'évènement du contact est plus flou, car la variance des informations du système visuel est dépendante du contexte : il y a par exemple des situations où l'observateur n'a pas de visibilité sur le point de contact. Au sens de la vision, le contact n'est qu'un en-cours de la variation continue de la différence de profondeur visible. En bougeant sa tête de façon à transformer la vision radiale en azimutale (Quand la situation s'y prête), le sujet peut voir le contact entre deux surfaces autrement que par une égalité de profondeur (voir figure 2.5). Le contact visuel est alors plus fiable aux yeux du cerveau.
- L'ouïe détecte le changement d'état du non-contact vers le contact, de façon brève et avec une intensité variable. Précise et fiable, l'ouïe fournit aussi des informations sur la dureté, la texture ou même l'effort initial du contact. De plus, la conduction osseuse permet de percevoir des informations auditives même en environnement bruyant. Malheureusement, l'ouïe ne peut déterminer un arrêt ni un prolongement du contact, et en cela d'autres perceptions sont nécessaires.

En pratique, comme la fiabilité de la vision dépend du point de vue, la variance que lui attribue le cerveau varie selon les situations. On estime que, lors de l'approche précédant le toucher, la kinesthésie est favorisée pour les directions radiales, tandis que la vision est favorisée pour les directions azimutales [van Beers *et al.*, 1999]. Pour des indices de profondeur, le toucher a donc théoriquement la priorité, mais les faits sont un peu plus compliqués que cela en réalité virtuelle (voir partie 2.2.2). L'ouïe et l'aspect cutané ne procurent pas d'informations sensorielles sur l'approche et ne servent donc qu'après.

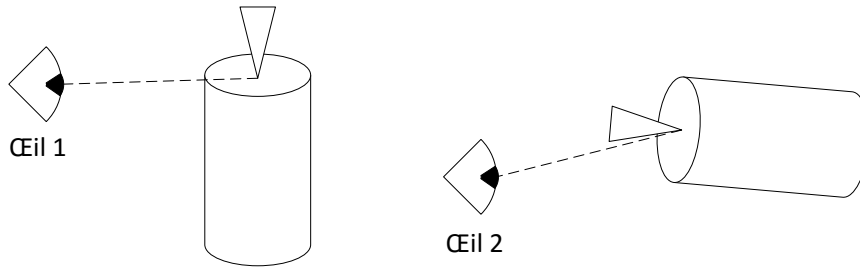


FIGURE 2.5 – Deux situations à variance visuelle différente. À gauche le regard est azimuthal, avec une bonne visibilité latérale sur le point de contact. À droite, l'égalité de profondeur n'est basée que sur la stéréoscopie

2.2.2 Priorité sensorielle

Lors de toute prise d'information, le cerveau utilise ses différentes perceptions pour acquérir des données sur l'environnement extérieur (voir figure 2.6). Il va ensuite pondérer leur importance selon le contexte et en tirer une perception globale de l'environnement.

En réalité virtuelle, le cerveau devrait normalement pouvoir s'appuyer avec fiabilité sur l'haptique, mais les technologies immersives récentes l'ont habitué à utiliser des environnements basés quasi-exclusivement sur le visuel, et donc à se concentrer dessus. Si le réflexe de tenter de toucher les objets demeure, la priorité sensorielle est unilatéralement du côté de la vision et en cas de conflit c'est le toucher qui est remis en question. Ce phénomène est également dû à la qualité inférieure des systèmes haptiques par rapport à celles des dispositifs d'affichage, ces derniers inspirant une meilleure confiance au cerveau : les technologies sont plus connues et plus éprouvées.

Dans le monde réel la situation est bien différente. Par le passé, on a souvent pensé que la vision servait unilatéralement de référence (le modèle de la dominance visuelle). Aujourd'hui, le modèle de la fiabilité relative implique que la priorité soit donnée aux informations sensorielles de la vision ou de l'haptique suivant la fiabilité supposée de ces informations [Burge *et al.*, 2010]. D'après Atkins *et al.* [2001], l'haptique sert de *ground truth* sur laquelle s'appuient et se vérifient les autres perceptions, en accord avec les dires de Ernst *et al.* [2000] qui voient en l'haptique une perception repère sur laquelle s'appuie le cerveau pour attribuer sa confiance aux autres perceptions.

Plasticité de la perception – Dans le virtuel où la priorité est inversée, si la vision possède le moindre défaut, l'haptique n'a à priori aucune chance d'être en parfaite synchronisation avec des informations visuelles imprécises ou erronées. C'est d'ailleurs souvent le cas, et les défauts du visuel sont abordés dans la partie 5.

Mais y compris dans le monde réel, la synchronisation visuo-haptique est imparfaite. La priorité sensorielle y est cependant dans le bon sens, c'est-à-dire que la vision peut se calibrer légèrement sur l'haptique lorsque cette dernière n'a aucune raison d'être remise en cause par le sujet [Atkins *et al.*, 2003]. Lorsque le cerveau ne remet pas en cause sa perception haptique, il s'adapte pour que le visuel soit cohérent.

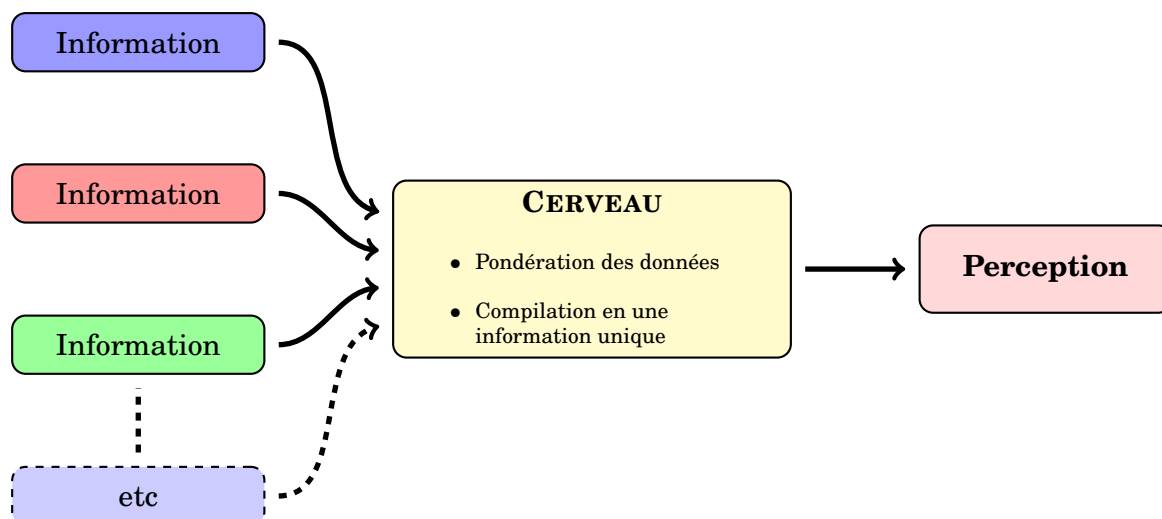


FIGURE 2.6 – Le processus de compilation des perceptions par le cerveau

Citation

« Observers can recalibrate their visual percepts when visual and haptic (touch) cues are discordant and the haptic information is judged to be reliable. » [Atkins *et al.*, 2003]

Il sera intéressant dans le futur de chercher quelles modalités permettent d'agir en faveur de la variance du toucher, afin d'en améliorer la fiabilité perçue par le cerveau. Idéalement, le but serait d'aller jusqu'à inverser la priorité sensorielle pour la rétablir à l'avantage de l'haptique.

Ce basculement de priorité sensorielle est intimement lié à la présence et à l'immersion, qui sont toujours limitées par le manque de connaissances du sujet et par des barrières technologiques, malgré des avancés certaines ces dernières années.

2.2.3 Compléments et substituts sensoriels

Les conséquences d'une action d'utilisateur ne sont pas toutes purement haptiques et les systèmes doivent également reproduire tous les phénomènes induits par le mouvement et le positionnement par rapport aux objets, comme le mouvement de l'ombre portée ou les interréflexions. L'ajout de substituts sensoriels peut aussi compenser un système haptique moins performant en proposant aux sujets d'autres indices de perception.

Une substitution complète du toucher n'atteindra pas les mêmes niveaux d'efficacité qu'un vrai retour haptique (même si un peu de pratique permet des performances correctes [Richard & Coiffet, 1995]). Cependant, ces substitutions sont souvent évaluées sur leur capacité à reproduire le réel (avec des questionnaires de présences par exemple) et bien moins souvent sur leur performance dans la réalisation d'une tâche pour laquelle on les aurait spécifiquement conçues. Par analogie, si le braille ne donne pas aux aveugles l'impression de recouvrer la vue, il leur permet de lire efficacement, ce qui est bien l'objectif. La substitution sensorielle, s'il s'agit d'être *performant* et non nécessairement *réaliste*, peut s'avérer pertinente.

De plus, le rôle des substitutions sensorielles n'est pas seulement de remplacer des sens, mais aussi de faire le lien entre ceux-ci. Des perceptions décorréélées peuvent être perçues comme issues de plusieurs événements différents [Stein *et al.*, 1995].

Une fois prises les précautions adéquates, la substitution sensorielle permet de simplifier grandement les systèmes haptiques et d'éviter un système théoriquement plus réaliste mais moins efficace dans la pratique. Les bons substituts autorisent de nouveaux moyens d'interaction, plus symboliques mais parfois performants. Sont utilisés par exemple des flèches d'effort et de déformation, des masques, ou encore des changements de couleurs [Sreng *et al.*, 2006].

Quantité de compléments et substituts. Le cerveau utilise tous les indices qui lui sont fournis, et la multiplication des indices sensoriels est jugée significativement bénéfique [Kitagawa *et al.*, 2004]. Attention cependant à ne pas surcharger les scènes, surtout avec des éléments intrusifs, car toutes les méthodes ne se prêtent pas au jeu. Il faut favoriser l'intuitivité, les affordances, et le naturel qu'ont les sujets à utiliser telle ou telle perception, en tenant compte de la charge cognitive comme de l'intrusivité. Les métaphores sonores par exemples sont bien trop envahissantes pour un usage continu et peuvent s'ajouter inutilement à la charge cognitive [Chan *et al.*, 2010], elles doivent donc être utilisées minutieusement. La vision est moins intrusive mais a le défaut de nécessiter un regard actif du sujet pour que celui-ci ne passe pas à côté du stimulus [Lindeman *et al.*, 2006].

2.2.4 L'apprentissage

Une fois le schéma de perception établi et reproduit, des effets d'apprentissage commencent à se manifester. L'apprentissage représente les progrès que font les sujets avec un système s'ils l'utilisent plusieurs fois. Il faut différencier deux types d'apprentissage :

- **La formation à la tâche** : La tâche apprise doit pouvoir être reproduite dans un environnement réel.
- **La formation au système** : Les sujets doivent atteindre un niveau de performance suffisant lors de l'utilisation d'un simulateur.

Le premier aspect de l'apprentissage est particulièrement important pour la réalité virtuelle et est plus facile à atteindre si la simulation contient des modalités haptiques. Les simulations mettant en jeu plusieurs sens sont mieux assimilées au réel, et mieux apprises pour être reproduite en réel [Hoffman, 1998]. Le second aspect permet d'utiliser efficacement des simulateurs qui peuvent poser des difficultés au premier abord. L'apprentissage permet notamment d'améliorer l'acceptation de substitutions sensorielles qui pourront combler les lacunes de l'haptique lors de la simulation [Richard & Coiffet, 1995].

Nous avons écrit précédemment que la kinesthésie est fortement sensible à l'apprentissage puisque la précision d'un sujet naïf est inférieure à celle d'un sujet expérimenté. Dès lors que l'on raisonne par tâches à effectuer ou par simulations à réaliser, l'apprentissage influence la vitesse et la précision des mouvements des sujets, et donc les résultats. De plus, les effets d'apprentissage ne se limitent pas seulement à la connaissance des systèmes et des simulations mais également à l'expérience globale de la personne : par exemple, des études ont montré que les sujets masculins et féminins peuvent avoir des stratégies d'approche différentes qui jouent sur la précision et la vitesse d'exécution [Adam, 1999]. Les expériences passées avec des nouvelles technologies, la curiosité et le caractère de la personne sont autant de paramètres influents sur le résultat des simulations.

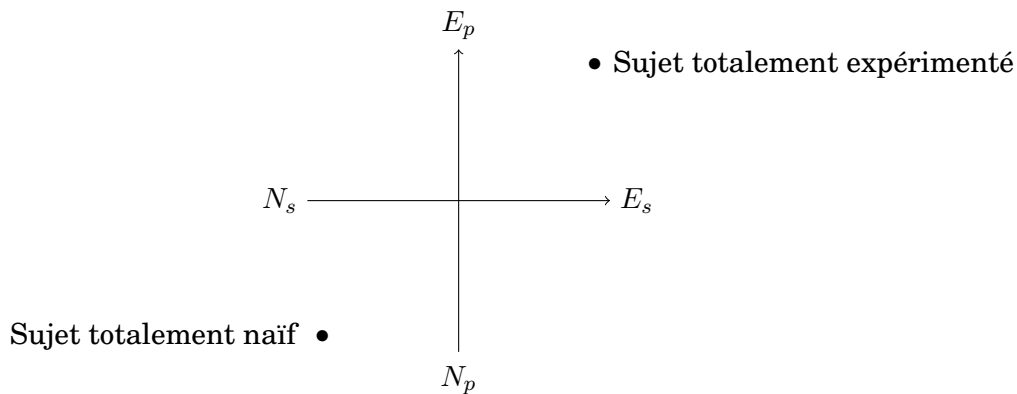


FIGURE 2.7 – Deux domaines d'expertise des simulations chez Renault. Les utilisateurs sont jugés sur deux paramètres : leur connaissance des simulateur (S) et leur connaissance des produits (P). Ils sont ensuite notés, de naïfs (N) à expérimentés (E).

Connaissance des systèmes – La difficulté est de satisfaire non seulement les utilisateurs expérimentés, qui réclament de la précision et de l'efficacité, mais aussi les naïfs, auxquels il faut implanter les bonnes bases. Pour ces derniers, il est nécessaire de rendre la simulation plus intuitive et ergonomique afin leur en ouvrir l'accès. Même si l'utilisation naïve n'exploite pas toutes les possibilités du système, elle doit faire manifester suffisamment d'intérêt aux nouveaux utilisateurs, et à plus forte raison s'il n'y a pas encore d'utilisateurs expérimentés. L'introduction de CAVEs dans l'industrie s'est confrontée à des problématiques comparables, alors qu'il était difficile d'évaluer l'ampleur des possibilités d'applications avant leur déploiement et leur utilisation.

La figure 2.7 illustre les deux types d'expertise à acquérir lors de l'utilisation d'un simulateur :

- D'une part la connaissance de l'environnement et des tâches à effectuer (la connaissance du produit que l'on simule). Elle permet à l'utilisateur de faire son travail, de faire le lien avec le monde réel en faisant fonctionner ses mémoire proprioceptives et visuelles pour libérer de la charge cognitive sur les autres détails.
- D'autre part, la connaissance des systèmes. Celle-ci permet au sujet d'agir en toute confiance et connaissance des outils interactifs, sans se perdre dans la découverte des différences avec le réel par exemple. Idéalement, le système doit être totalement transparent derrière des fonctionnalités intuitives, afin de minimiser le besoin d'expertise système.

Affordances

Les affordances sont définies comme l'ensemble des possibilités offertes par un objet ou un environnement et, plus particulièrement, comme la particularité de ces derniers à suggérer leurs possibilités [Gibson, 2014]. Ainsi, peu ou pas d'apprentissage n'est nécessaire si les affordances d'un outil sont correctes, car il suggère à l'utilisateur sa propre utilisation. Quelques bonnes pratiques, comme le skeuomorphisme, peuvent aider l'utilisateur à mieux percevoir les affordances d'un objet : par exemple, l'ajout d'une mine à un crayon virtuel peut aider l'utilisateur à comprendre qu'il peut écrire avec.

Biais – Les effets d'apprentissage sont souvent bénéfiques à la réalité virtuelle, mais également sources de biais lors des expérimentations. S'il est par exemple bien connu (et mesurable) que les habitués des simulations sont moins sensibles à la cinétose, il est bien plus difficile de quantifier l'à priori que chacun a sur la simulation, qui a pourtant une influence sur les résultats. Selon son expérience et son caractère, la personne appréhende ou non la simulation, et cela définit son état initial d'acceptation ou de méfiance par rapport au système. Un sujet qui a inconsciemment moins appréhendé la simulation que les autres aura souvent de meilleures performances.

Suivant le même principe, l'apprentissage peut parfois générer des erreurs difficiles à gommer chez les sujets. Une fois que le cerveau croit savoir une chose établie, il s'adapte légèrement pour qu'une autre chose légèrement différente soit perçue selon le même schéma. Pour la perception des distances et des échelles par exemples, il existe deux stratégies : soit l'on a une idée de la taille et on en déduit la distance, soit l'inverse (même si d'autres indices que l'apprentissage entrent en jeu, comme la vergence oculaire). Et si le cerveau a une idée erronée de la taille, par effet d'apprentissage, il est compliqué de lui faire changer d'avis et il risque de calibrer le reste de sa perception sur son savoir biaisé. Un peu de temps, un nouvel indice de perception ou une nouvelle modalité sensorielle peuvent forcer la perception à se recalibrer [Lassagne *et al.*, 2017b].

Acceptation du système – Des deux types de connaissances précédents, l'un peut être acquis sans même entrer dans un simulateur de réalité virtuelle. La connaissance des systèmes ne le peut pas et s'avère pourtant tout aussi importante. La réalité virtuelle commence seulement à faire ses preuves et n'a pas encore la confiance de tous les utilisateurs potentiels. Or, dans ce domaine où les choix et influences du cerveau sont peu connus, les biais psychologiques sont forts. Par exemple, le premier aperçu du système est important, et qu'il soit positif permettra à l'utilisateur d'accélérer son acceptation des perceptions, voire de la permettre. Les simulateurs doivent être acceptés par les utilisateurs novices comme par ceux plus expérimentés. En entreprise, des processus rigoureux de validation des outils permettent aussi d'accélérer et surtout de légitimer l'acceptation.

2.2.5 Présence

La présence est en quelque sorte le résultat de tous les phénomènes psychologiques servant à immerger un sujet dans un environnement virtuel. On peut définir la présence comme la sensation « d'être là », même si de nombreuses définitions différentes se disputent la vérité. C'est en tout cas l'essence de la réalité virtuelle, dont les simulateurs sont parfois définis simplement comme des outils de téléprésence [Steuer, 1992].

De nombreux chercheurs se sont attelés à comprendre le sentiment de présence, ses aspects technologiques et ses aspects psychologiques, mais peu s'accordent sur la définition de ses facteurs de variations. On peut séparer la présence en deux sous-ensembles, l'immersion et l'implication [Witmer & Singer, 1998]. Certains systèmes peu immersifs, comme des livres, peuvent produire beaucoup d'implication, tandis que des systèmes de visualisation de haute performance sans scénarisation manquent parfois d'implication. Si l'on lie parfois implication à interaction, il est plus difficile de définir l'immersion. Slater soutient par exemple que l'immersion est un aspect matériel et logiciel, des capacités de rendu du système, technologique et objectif, tandis que Witmer soutient que l'immersion est un concept subjectif, un état psychologique. Les deux points de vue se défendent : l'ajout de technologies visuelles, le rapprochement vers le réel, est effectivement un facteur concret

d'augmentation de l'immersion. Ces discordes sur les mots ne font de toute façon pas avancer le débat, surtout que d'autres aspects plus psychologiques entrent en jeu. S'il est plus aisé dans le cadre d'expérimentations de faire l'hypothèse que l'immersion est objective, cela ne rend pas cette hypothèse juste pour autant, et il reste difficile de mesurer et quantifier l'immersion.

Intérêt à maximiser la présence

Toutes les perceptions participent à la sensation de présence et, même si la vision est la plus évidente, l'haptique a évidemment une forte influence. Pour s'en rendre compte, il suffit de tester soi-même sa sensation d'immersion dans des simulateurs qui exploitent plusieurs sens : par exemple, la sensation de vitesse est de meilleure qualité si un vent artificiel nous souffle sur le visage. La communauté scientifique a autant de difficulté à mesurer présence et immersion qu'elle est certaine de leur impact positifs sur toutes les caractéristiques qui font qu'une simulation est réussie.

La présence représente non seulement la force de l'illusion offerte aux sujets, mais également la confiance que le cerveau accorde inconsciemment à son système sensoriel lorsqu'il se trouve dans ce type d'environnements. La tromperie des sens étant à la base de la réalité virtuelle, ce procédé est également bénéfique en haptique. Si le cerveau a une confiance absolue dans sa perception le système, les petits défauts et imprécisions de celui-ci sont lissés par la perception et la simulation est bien plus réussie.

Quantifier la présence

Des mesures objectives ? – La présence est une donnée complexe mais utile à mesurer, puisque la quantifier avec précision permettrait d'évaluer la qualité et les performances des simulateurs de manière objective. Malheureusement, la présence n'est pas qu'un simple calcul mathématique, et elle ne se mesure souvent qu'avec des questionnaires dont les questions risquent d'être interprétées par les sujets suivant le contexte de l'expérimentation. On peut citer notamment le questionnaire de Witmer et Singer, une référence dans le domaine, particulièrement dans sa révision de 1998 [Witmer & Singer, 1998]. Ce questionnaire regroupe quatre grandes familles de facteurs de présence, qui permettent de classer et de pondérer les réponses des sujets pour déduire une note de présence (voir tableau 2.2). À noter qu'il existe d'autres questionnaires de présence, comme le SUS [Usoh *et al.*, 2000] dont l'objectif est de comparer de manière plus subjective les environnements visités à ceux qui ne sont qu'un simple affichage.

Choix des mots – Il est important, tout au long de la simulation mais particulièrement dans les questionnaires, d'utiliser un vocabulaire choisi, précis, et testé. Cette rigueur permet de limiter les effets de subjectivité en utilisant des mots dont les effets sur les sujets sont connus et validés. Par conséquent, il faut faire attention non seulement au questionnaire choisi, mais aussi à sa traduction. Dans nos études, nous utilisons la traduction canadienne-française de l'Université du Québec, validée par expérimentation [Robillard *et al.*, 2002]. Les auteurs préconisent aussi de veiller à conserver l'ordre des questions.

Facteurs imprévisibles et biais – Certaines études ont montré à quel point une question sur la présence peut trouver sa réponse dans des faits tout autres, comme l'humeur du jour, le confort de l'endroit ou le caractère de la personne [Slater, 2004]. Il est aussi important de préciser que la présence mesurée dépend de chaque simulateur, et que le concept est

Facteurs de contrôle	Facteurs sensoriels	Facteurs de distraction	Facteurs de réalisme
Degré de contrôle	Modalité sensorielle	Isolation	Réalisme
Temps réel	Cohérence sensorielle	Attention	Cohérence des informations
Malléabilité de l'environnement	Richesse de l'environnement	Désorientation	Signification de l'expérience
Anticipation	Complémentarité sensorielle	Conscience de l'interface	
Moyen de contrôle	Recherche active		

TABLE 2.2 – Les différents facteurs du questionnaire de Witmer & Singer [Witmer & Singer, 1998]. Chaque paramètre donne lieu à des questions, dont les réponses sont des notes comprises entre 1 et 7. Une fois toutes les réponses acquises, une pondération précise s'applique avant d'obtenir le résultat final.

indissociable du virtuel. En effet, comme l'explique Usoh *et al.* [2000], la notation de la présence n'a de sens que si la note maximale n'est pas possible. Sinon, la question risque d'être réinterprétée comme une mesure du sentiment d'aisance dans l'environnement, et chacun sait que l'on peut se sentir mal à l'aise dans le réel (où la présence est pourtant théoriquement maximale).

Sur le même principe, on ne peut pas vraiment comparer deux environnements virtuels différents, puisque les sujets vont replacer la question dans un certain contexte et juger la présence en conséquence [Slater *et al.*, 2000]. En résumé, les notes de présence sont loins d'être absolues et ne peuvent qu'être comparées qu'en contextes comparables.

Quantifier seulement des variations de la présence – Malgré les difficultés à mesurer objectivement la présence évoquées, on peut obtenir des résultats fiables si l'on mesure simplement les variations de présence liées à l'introduction de légères différences dans une même scène [Usoh *et al.*, 1999]. Dans notre cas, on s'intéresse particulièrement aux variations de la présence liées à l'apport de modalités haptique. Les effets des interactions sur la présence, y compris sans haptique et avec seulement des substitutions sensorielles, ont déjà été étudiés et jugés positifs [Biocca *et al.*, 2001], notamment grâce à une meilleure implication des sujets. Une interaction plus naturelle et plus efficace n'est que bénéfique pour la présence, et donc pour l'immersion et les performances globales de la simulation.

On ne peut manipuler n'importe comment les facteurs de variations de présence objectifs et subjectifs pour en quantifier l'apport. Chaque facteur doit être changé indépendamment des autres, pour en évaluer l'apport avec soin. De plus, il est préférable de fixer les facteurs subjectifs de la figure 2.8 pour faire varier un des facteurs objectifs, ou inversement.

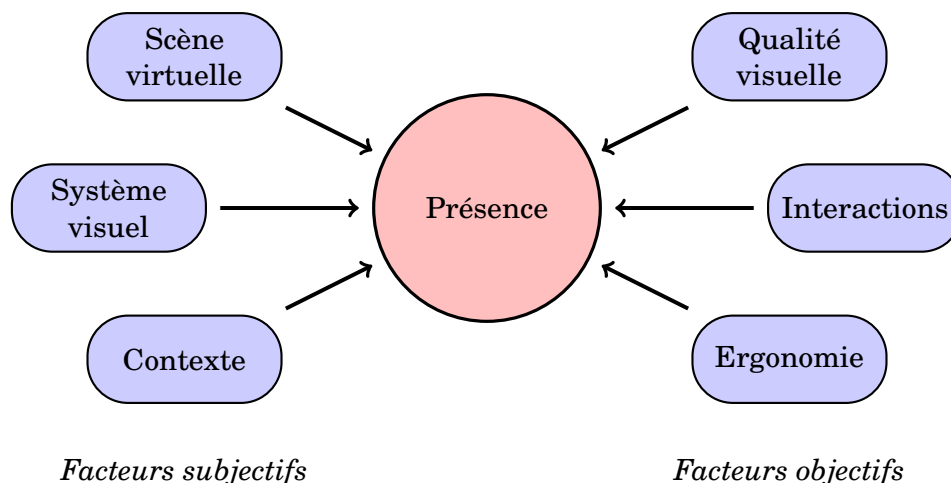


FIGURE 2.8 – Les facteurs de variation de la présence. Si l'on souhaite comparer la présence induite par deux simulations, celles-ci doivent fixer des facteurs de même type pour comparer ce qui est comparable.

2.3 Rendu haptique

Le rendu haptique, ou *haptic rendering* dans la langue de Shakespeare, est un élargissement de la définition du rendu habituellement associé au visuel. Il s'agit de créer un stimulus de perception et de le proposer au sujet, par dessus ou en complément des stimuli qu'il reçoit déjà [Salisbury *et al.*, 2004].

Comme on l'a vu dans la figure 2.1, le rendu haptique comprend plusieurs tâches à effectuer. Ces étapes sont toutes à réaliser en temps réel, et le cycle est bidirectionnel : l'homme agit sur le système, qui agit à son tour sur l'homme par l'intermédiaire d'une machine [El Saddik, 2007] (voir figure 2.9).

Par temps réel, on entend en fait qu'il faut dépasser les fréquences détectables par les sens humains. Selon les systèmes, il faut parfois atteindre jusqu'à 1Khz car certains deviennent instables lorsqu'ils vibrent à plus basse fréquence, notamment lorsque l'on essaie de simuler des objets rigides [Basdogan & Srinivasan, 2002; Bayart, 2007]. Le visuel étant souvent responsable de longs temps de cycle et de fréquences plus basses, il est recommandé de paralléliser les processus de rendu pour permettre à l'haptique d'avoir une fréquence

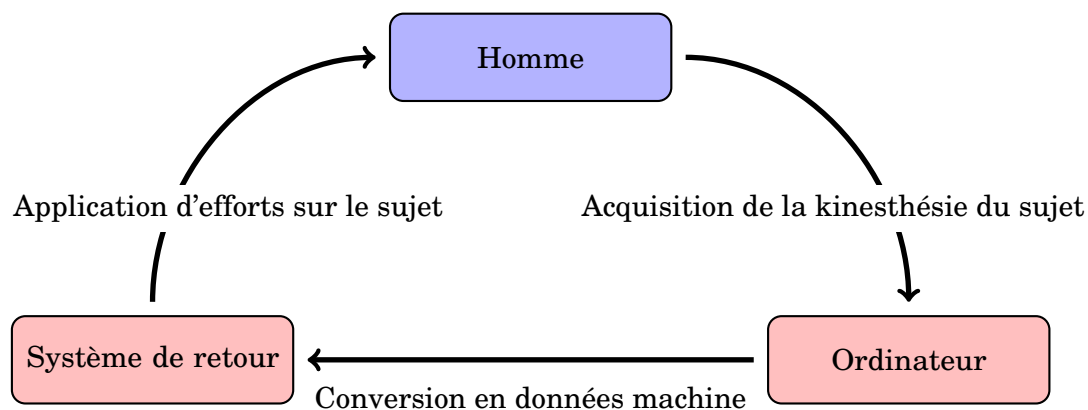


FIGURE 2.9 – La boucle d'interaction de l'haptique.

supérieure à celle de l’affichage, quitte à ce que l’on interpole les chaînons manquants si nécessaire.

2.3.1 Acquisition des données

Première étape indispensable, Le calculateur du système doit acquérir la connaissance de l’environnement et de l’objet de l’interaction. Dans le cas d’un toucher manuel, c’est la localisation dans l’espace de la main et des doigts qui doit être connue. Le tracking doit être le plus fin et précis, puisque ses erreurs se cumuleront aux imprécisions visuelles décrites dans le chapitre 5.

Le système doit connaître en temps réel la localisation de tous les contours virtuels de chaque élément susceptible de participer à l’interaction, les acteurs comme les cibles potentiels. On implémente donc un système de tracking pour les objets physiques et des boîtes de collision autour des objets virtuels.

2.3.2 Détection de collision

Avant de d’entamer le rendu d’un effort, il faut en détecter toutes les caractéristiques. La détection de collision aura pour rôle d’acquérir la localisation tridimensionnelle de la collision (le point de contact), sa vitesse, les directions et angles des vecteurs force, les masses des objets.

Les moteurs physiques permettant de détecter les collisions sont à ce jour assez nombreux et il n’y a pas de verrou technologique majeur. Il reste cependant la problématique du taux de rafraîchissement, de la discrétion des mouvements, et celle de la compatibilité entre les moteurs de collisions et les outils numériques industriels.

Synchrone ou asynchrone – On a vu que, tout comme pour le visuel, le taux de rafraîchissement du rendu haptique doit dépasser les capacités humaines. Dans les applications où rendu haptique et rendu visuel sont dans la même boucle, le rendu haptique doit souvent se contenter seulement d’une soixantaine d’itérations par seconde, synchrone avec les 60 images par secondes qui sont souvent le standard des systèmes visuels. Il est alors préférable de détecter et lancer les événements (contact/non contact) de façon synchrone avec le visuel, mais de faire tourner le rendu haptique de façon asynchrone.

Domaine discret – La notion de contact n’existe pas en domaine discret. Soit la main ne touche pas l’objet, soit elle le pénètre, et la largeur de l’intervalle entre ces deux événements dépendra des performances des dispositifs. Le tout est donc que l’incrément entre les état *non pénétration* et *pénétration* soit le plus petit et court possible. Pour diminuer artificiellement le temps de réaction des dispositifs en attente de pénétration, on peut grossir légèrement la zone de collision. Mais si l’utilisateur rentre dans la zone de collision étendue sans vouloir toucher l’objet et qu’il fait demi-tour, son expérience est fortement dégradée.

2.3.3 Calcul des efforts et détermination des réponses

Après que le système ait détecté le besoin de rendre un toucher, il doit encore en calculer les propriétés. Des efforts enregistrés par la détection de collision, un algorithme déduit quelle est la réponse nécessaire et comment la combiner au mieux avec le matériel haptique dont l’on dispose.

C'est ici que le calculateur définit comment le retour est reproduit dans le virtuel, avec quels retours cutanés et/ou kinesthésiques, quels compléments et métaphores de toucher, quelles astuces algorithmiques. Autant les étapes d'acquisition des données et de détection des collisions sont toujours à peu près semblable, autant les réponses déterminées dépendent des systèmes, des scénarios, et surtout des intentions des concepteurs.

Réponse réaliste ou symbolique

Citation

« La fidélité psychologique n'a pas de lien direct et simple avec les autres niveaux de fidélité. » [Burkhardt *et al.*, 2003]

Cette phrase de Burkhardt amène à s'interroger sur la pertinence des rendus haptiques réalistes, en revenant aux sources de la démarche. Le rendu haptique, comme il est recherché aujourd'hui, peut répondre aux besoins avec deux philosophies bien différentes, mais pas incompatibles.

- Améliorer la présence virtuelle et mieux immerger les sujets en ajoutant un nouveau moyen de perception de l'environnement. On essaie dans ce cas de produire un retour *réaliste*
- Grandir les possibilités des simulateurs par des capacités d'interaction, c'est-à-dire permettre aux utilisateurs d'être acteurs et plus seulement spectateurs. Le retour haptique répond à des critères d'utilisabilité avant ceux de réalisme, on essaie dans ce cas de produire un retour *symbolique*.

Le réel étant connu et efficace, il est normal de s'en inspirer, et il est aussi particulièrement intéressant de réfléchir à la réelle relation entre présence et qualité du toucher. Certains aspects du toucher réaliste ne sont pas indispensables à toutes les applications et peuvent être pourtant les plus compliquées à mettre en place. Le développement du moteur de rendu comprend le choix difficile de se focaliser plutôt sur le réalisme ou plutôt sur un besoin bien précis et à la façon d'y répondre le plus efficacement possible. Bien entendu, les deux préceptes sont parfois compatibles, mais un compromis peut être nécessaire lorsque le réalisme est trop difficile à atteindre.

Il existe de nombreuses méthodes de production de rendus symboliques. Notamment, les systèmes de substitution sensorielle optimisent beaucoup leur efficacité par la symbolique et les affordances. Il est aussi possible d'utiliser de la symbolique avec des systèmes cutanés ou kinesthésiques. Un bon exemple est celui de l'application d'une vibration cutanée suivant le principe du sonar pour détecter la proximité des pièces.

Une méthode rigoureuse de développement de symboliques consiste à se concentrer sur une division événementielle des actions [Kuchenbecker *et al.*, 2006]. En traitant séparément l'approche, le contact, la pénétration faible et la pénétration forte, on peut ajouter à chaque événement des réponses très variées. Ainsi, on répond au mieux aux besoins des utilisateurs, besoins qui peuvent n'être ciblés que sur quelques événements particuliers.

Choix des modalités

Citation

« Tactile cues, such as those conveyed via vibrations or varying pressures, are effective as simple alerts. Kinesthetic devices are advantageous when tasks involve hand–eye coordination (for example, object manipulation), in which haptic sensing and feedback are key to performance. » [Hale & Stanney, 2004]

Choix contextuel – Les modalités haptiques les plus pertinentes sont rarement les mêmes suivant les différents cas d’usage. On l’a dit précédemment, le réalisme ne maximise pas toujours la performance, et il est souvent complexe à reproduire. À travers des substituts sensoriels, on peut parfois ajouter une dimension interactive efficace à moindre coût, tandis que certaines applications sont irréalisables sans modalités kinesthésiques. C’est bien le contexte et le but recherché qui guident la nature des retours, et non l’inverse.

Discret ou continu, temporellement, spatialement – Les modalités cutanées classiques sont plus performantes lorsqu’il s’agit de transmettre des informations ponctuelles comme des alertes, tandis que les modalités kinesthésiques trouvent leur intérêt lorsque de réels efforts continus sont à reproduire [Hale & Stanney, 2004]. Il existe malgré tout des modalités cutanées qui reproduisent des événements continus, plus symboliques, par exemple en utilisant des systèmes chauffants, ou en combinant le principe d’un sonar avec un système vibrotactile. Les substituts sensoriels peuvent reproduire plus ou moins tous types d’évènements, mais certains sont plus adaptés que d’autres. Par exemple, les signaux auditifs continus sont rapidement intrusifs, tandis que les indices visuels ont le défaut de nécessiter visibilité et attention.

De plus, la différenciation entre discret et continu ne s’applique pas seulement au domaine du temporel mais aussi à celui de l’espace. Il est utile que le sujet sache précisément où il a touché l’objet et avec quel décalage plutôt que de savoir seulement qu’un contact a eu lieu, car cette confirmation supplémentaire (et absente du réel) rassure. On envisage parfois aussi de fournir un rendu haptique progressif pour symboliser l’approche et l’éloignement qui encadre un toucher, pour guider les utilisateurs et améliorer les performances.

Critère de performance – Les différentes modalités n’offrent pas les mêmes performances dans les mêmes situations, et les différents scénarios n’ont de toute façon pas les mêmes besoins. Il est important de sélectionner les modalités d’interaction qui fournissent les performances recherchées dans le contexte recherché. Certains contextes peuvent d’eux-même améliorer la performance des utilisateurs, et ainsi ne pas nécessiter une modalité si performante, et inversement [Lassagne *et al.*, 2017a; Lohse *et al.*, 2010]. La performance du visuel est aussi à considérer, puisqu’un visuel peu précis requiert un modalité haptique d’autant plus performante.

2.3.4 Application des retours

C’est la fin de la boucle et le retour du flux vers le sujet. Le calculateur envoie ses consignes aux différents dispositifs qui se chargent d’exécuter les conséquences calculées des mouvements et du positionnement du ou des utilisateurs. Certaines consignes peuvent être

envoyées au système visuel ou encore au dispositif de son, en fonction des compléments qui ont été choisis.

Nous verrons dans le chapitre 4 de ce document comment classer les différentes technologies de systèmes haptiques existantes, et quels retours peuvent être appliqués.

2.3.5 Temps de latence



Citation

« Le délai écoulé entre l'action du conducteur et le résultat dans la restitution de stimuli perceptuels introduit des malaises (mal de simulateur) s'il est trop différent de ce qui est ressenti. » [Kemeny, 1999]

Les temps de latence ont toujours été un défi majeur en réalité virtuelle. Tous les mécanismes se déroulent en temps réel dans ce domaine sous peine de conflits sensoriels prononcés, notamment entre la vue et l'oreille interne (conflit visuo-vestibulaire). La latence, en hachant et retardant le temps réel, est une grande cause de **cinétose** (mal du simulateur) et de dégradations de la présence virtuelle. De plus, une trop grande latence empêche toute manipulation précise, la simulation souffrant d'un retard sur les retours sensoriels (qui aboutit à des dépassements de consigne).

Latence visuelle – La latence visuelle à partir de laquelle le cerveau humain est dérangé est estimée aux environs de 50ms, mais elle varie en fait de 20 à 200 millisecondes selon les sujets. Pourtant, on peut tout de même exécuter des tâches précises avec de la latence, en ralentissant ses actions. Certaines études ont démontré que la majorité des chirurgiens jugent les latences de moins de 300 millisecondes encore acceptables [Xu *et al.*, 2014]. Au niveau de la cinétose, on estime à 50ms la latence maximale nécessaire au bon déroulement d'une simulation de conduite dynamique [Kemeny, 2014]. De manière générale, dès que la latence est trop élevée, de nombreux symptômes de la cinétose se révèlent : maux de tête, nausées, troubles de l'équilibres, etc. On peut tenter de mesurer la cinétose par un *Simulator Sickness Questionnaire* [Kennedy *et al.*, 1993]

Latence haptique – Par rapport au visuel, l'haptique requiert une latence encore plus faible : si le seuil de conscience de la latence se trouve également aux alentours des 50ms, on estime à 25ms le temps de latence à partir duquel il y a une influence visible sur la vitesse d'exécution ou la performance [Jay *et al.*, 2007]. La latence d'un toucher, c'est-à-dire la durée entre le toucher effectif et la sensation de toucher du sujet, ne doit pas être confondue avec le taux de rafraîchissement des systèmes haptique, souvent décrit comme devant être supérieur à 1Khz.

Des études supposent que les latences ont, en haptique, plus d'influence sur la performance que sur l'expérience même [Alhalabi *et al.*, 2003]. Face aux latences, les sujets adaptent leur comportement et leurs performances de plusieurs façon.

Pour une tâche élémentaire donnée :

- Entre 25 et 50 millisecondes de latence, même si l'utilisateur n'en a pas conscience, ses erreurs augmentent sans variations sur le temps d'exécution.

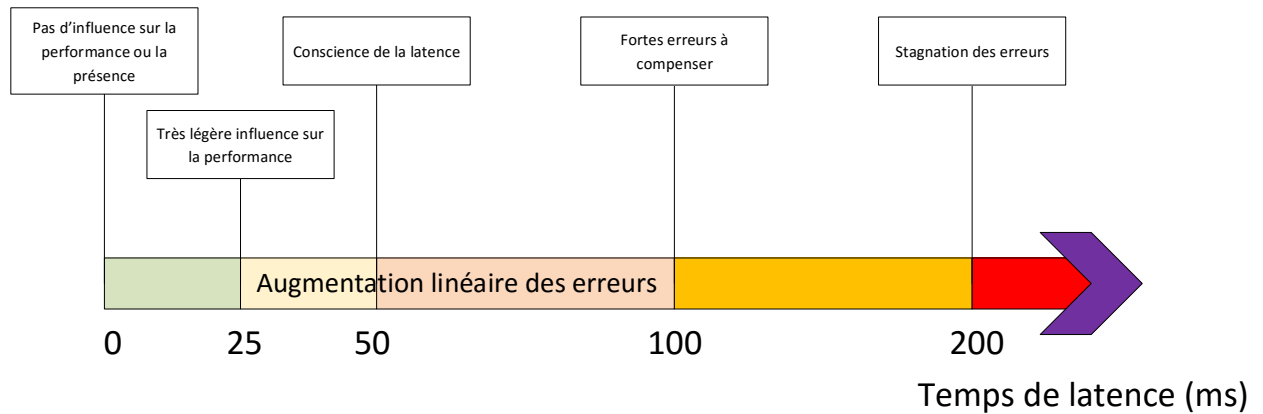


FIGURE 2.10 – Schéma simplifié des effets des latences sur les performances et la présence

- A partir d'environ 50 millisecondes [Vogels, 2004], l'utilisateur prend conscience de la latence et commence à ralentir ses mouvements pour y palier. Ses erreurs augmentent encore, ainsi que le temps d'exécution de la tâche qui augmente linéairement.
- Au delà de 100ms, le temps d'exécution continue d'augmenter linéairement, mais pas les erreurs qui augmentent beaucoup moins vite car les sujets ralentissent leurs mouvements. Ils optimisent leur mouvements en suivant la loi de Fitt [Fitts, 1954] pour minimiser les pertes de performance, et ce pas toujours consciemment.

Ces chiffres sont schématisés sur la figure 2.10.

Il faut cependant garder à l'idée que pour des tâches différentes, les lois sont bien plus complexes, et encore plus lorsque l'on inclut non plus seulement du toucher mais également des manipulations. Les erreurs augmentent de façon non linéaire et dépendent du mode de mouvement et de la difficulté de la tâche [Jay *et al.*, 2007]. Par exemple, les interactions avec des objets dynamiques sont beaucoup plus sensibles aux effets de latence que celles mettant en situation seulement des objets statiques, de même que les mouvements rapides seront plus pénalisés par les latences que les mouvements lents [Rank *et al.*, 2010].

Influences et solutions – Les erreurs ne dépendent pas de l'amplitude du mouvement dans un intervalle de temps raisonnable [Rank *et al.*, 2010], et peuvent être diminuées grâce à l'ajout d'un système prédictif de compensation de latence performant [Wang *et al.*, 2003]. Pour atteindre le but recherché, une application devra donc se focaliser sur l'optimisation d'un aspect précis, d'une tâche à effectuer, quitte à en sacrifier d'autres [Gunn *et al.*, 2005].

Les performances globales autant que les temps d'exécution sont largement améliorées avec la multiplication des indices de perception haptique, y compris en conditions moyennes de latence. Mais utiliser ce genre d'artifices ne résout pas le problème de fond, et ne suffit pas toujours. Les *barrières physiques* sont parfois trop importantes : à titre d'exemple, l'océan atlantique induit automatiquement une latence de 80 à 120 millisecondes entre la côte Est des États-Unis et la Grande Bretagne. Toute téléopération transcontinentale devra pour l'instant se contenter de cet ordre de grandeur, et aucun artifice logiciel (algorithme prédictif, d'anticipation, etc.) ne peut réellement réduire cette latence.

CHAPITRE 3

SYSTÈMES D’AFFICHAGE ET TECHNOLOGIES ASSOCIÉES

3.1 Le visuel indispensable à l’haptique et la présence

Dans le réel, le toucher et la kinesthésie sont intimement liés à la vision. La vision complète, précise ou même parfois remplace la kinesthésie lors des mouvements du corps, sans rentrer en conflit avec celle-ci. La qualité des systèmes d’affichage est donc d’une importance capitale pour que le visuel ne soit pas l’élément limitant la qualité de la simulation.

3.1.1 Indispensable mais imparfait

Les systèmes visuels souffrent cependant de nombreux défauts, comme des décalages visuels, des contraintes de compatibilité, ou seulement des caractéristiques dont il faut tenir compte. Les défauts viennent notamment d’imprécisions matérielles, comme un manque de finesse dans le calcul des pyramides de vision, mais leurs causes sont parfois plus difficiles à identifier tant elles peuvent relever autant de la qualité du système que de la scénarisation ou encore de la psychologie. Les chercheurs s’accordent par exemple à reconnaître la mauvaise estimation globale des distances et des échelles quels que soient les systèmes d’affichage et les technologies utilisés [Thompson *et al.*, 2004], mais les sources de ce défaut ne sont pas toutes précisément identifiées et encore moins quantifiées, même si les hypothèses vérifiées sont nombreuses. Ce sujet est approfondi dans le chapitre 5.

Citation

« Depth constancy is considerably less than perfect, perceived shape is distorted and absolute distance is misestimated. » Hibbard & Bradshaw [2003]

Il faut néanmoins garder à l’idée que les technologies ont récemment avancé à des vitesses record, et les expérimentations des années 1990 utilisaient à l’époque des systèmes de vision qui n’avaient rien à voir avec ce que l’on fait de nos jours. Chaque résultat peut être biaisé par le manque de fidélité qu’avaient les affichages les plus anciens, et par leur résolution souvent trop basse. Certains biais du visuel ont longtemps été contraints par la qualité graphique. Des études plus récentes ont d’ailleurs découvert avec surprise que

les distances n'étaient peut-être pas si mal estimées que cela [Interrante *et al.*, 2006], et certains considèrent que de nombreuses études sont à recommencer avec l'état de l'art actuel.

Redondance des informations – Tous ces indices visuels de perception de la profondeur sont redondants et compilés par le cerveau pour obtenir l'information la plus robuste. L'homme accorde une grande importance à sa vision et multiplier les indices permet d'écartier les résultats aberrants pour supprimer les erreurs [Cutting & Vishton, 1995]. L'habitude aidant, le cerveau sait que les erreurs qu'il commet sont plus rares lorsque beaucoup d'indices redondants corroborent la même information, et il leur attribue en conséquence une variance supérieure lors de sa compilation.

Maximiser la présence – Malgré la difficulté à la mesurer, on sait bien se faire un avis subjectif de la présence et on connaît son impact sur la qualité de l'expérience (voir partie 2.2.5). Augmenter la présence, c'est presque toujours améliorer l'expérience. Dans notre cas, augmenter la présence apportée par le visuel pourra compenser les effets néfastes de l'haptique si le système n'est pas à la hauteur. Il serait dommage de ne pas maximiser (dans une certaine mesure) la qualité des systèmes visuels alors que beaucoup d'avancées technologiques sont connues et maîtrisées. Bien entendu, les performances du visuel n'impliquent pas que la simulation soit réussie, et une scène intelligemment conçue peut être meilleure qu'un visuel qui a simplement maximisé le nombre de pixels.

Citation

« It is possible that relatively simple haptic feedback when combined with high-quality visual images, which have become very inexpensive to produce, could create a similar sense of contact produced by more expensive haptic displays alone. » [Lindeman *et al.*, 2002]

3.1.2 Caractéristiques d'un afficheur

Les systèmes d'affichage sont jugés sur des paramètres quantifiés qui définissent leurs performances. Ces paramètres sont plus ou moins valorisés en fonction du prix que l'on est prêt à mettre dans l'afficheur, l'idéal étant que chacun surpasse les capacités de l'appareil de vision humain.

- La *définition* est un premier facteur de qualité, qui définit si le sujet verra une matrice de pixel ou une image continue. Il s'agit de la taille des pixels, qui doivent autant que possible tenir dans la minute d'arc qu'est la résolution spatiale moyenne de l'œil.
- La *fréquence d'image* (ou *frame rate*), en images par secondes (i/s), permet la perception d'un flux visuel continu. Le besoin se situe généralement entre 30 et 60 i/s par secondes, et certaines applications nécessitent un minimum de 60 i/s [Kemeny, 1999]. Physiologiquement, l'humain différencie peu les flux au-dessus de 60 i/s.
- La *luminosité* et le *contraste* permettent de juger de la fidélité lumineuse des afficheurs (le contraste est un ratio des luminances minimales et maximales). On peut également

mesurer la profondeur des noirs ou la balance des blancs (c'est-à-dire la colorimétrie exacte d'un blanc supposé parfait).

- La *colorimétrie* détermine le réalisme du rendu des couleurs.
- Pour finir et non des moindres, *La puissance graphique* permet d'effectuer tous les calculs du rendu visuels, l'affichage des polygones mais aussi les calculs de lumières, ainsi que les effets visuels gourmands comme l'antialiasing ou la stéréoscopie.

Score de réalisme – Classer les systèmes d'affichage suivant leur qualité n'est pas trivial, puisqu'il faut pondérer l'influence de nombreux paramètres, et notamment ceux cités ci-dessus. Le suivi de modèles de réalisme est également nécessaire, puisque différentes définitions de réalisme sont en concurrence : La simulation doit-elle être ressentie comme réaliste, conçue comme réaliste, les flux de perception doivent-ils être fidèles à la réalité ou seulement maximiser la présence ou l'immersion ? Les travaux de Perroud *et al.* [2017] offrent quelques réponses à ces questions et proposent un modèle de note de réalisme, contextuel, à attribuer à chaque système d'affichage.

Dans les deux prochains paragraphes, on s'intéresse aux deux systèmes les plus pertinents dans notre contexte : les CAVEs et les HMDs.

3.2 CAVE Automatic Virtual Environment (CAVE)

Les CAVEs ont été les premiers systèmes de réalité virtuelle à avoir une application industrielle chez Renault, c'est pourquoi il est intéressant de commencer par eux. Quand bien même les technologies de l'époque peuvent paraître si dépassées, les CAVEs sont nés dès le début des années 1990 [Cruz-Neira *et al.*, 1993], et ont dès lors apporté des environnements 3D dotés de stéréoscopie et de parallaxe bien plus convaincants que tout ce qui s'était fait précédemment. Les CAVEs ont été moteurs de l'engouement autour de la réalité virtuelle né dans cette décennie, et n'ont pas cessé d'évoluer avec les progrès fulgurants réalisés dans le domaine des cartes graphiques et des vidéoprojecteurs.

3.2.1 Principe de fonctionnement des CAVEs

Un CAVE est une salle cubique, dont les murs sont des écrans. Il peut être composé de 2 à 6 murs-écrans, selon la volonté de ses concepteurs, et intègre 3 technologies principales.

1. Un *affichage stéréoscopique*, quel que soit la technologie de vision stéréoscopique (active, passive, polarisation, anaglyphe, etc.). Il permet d'afficher une image différente pour chaque œil, comme dans le monde réel (les deux yeux n'ont pas la même localisation exacte, donc pas le même point de vue, donc pas la même image). La stéréoscopie permet de donner au cerveau des indices binoculaires de profondeur.
2. Un *calculateur temps réel des pyramides de projection*, qui permet de calculer chaque image en fonction de la position de chaque œil de l'utilisateur, et de la projeter aux bonnes dimensions sur chaque mur. Cela permet d'obtenir la parallaxe souvent absente de la plupart des technologies de stéréoscopie connues du grand public (notamment le cinéma) (voir figure 3.1). En contrepartie, la parallaxe limite le nombre d'utilisateurs. Les CAVEs sont le plus souvent mono-utilisateurs, puisque les images sont calculées pour le point de vue d'une seule personne.

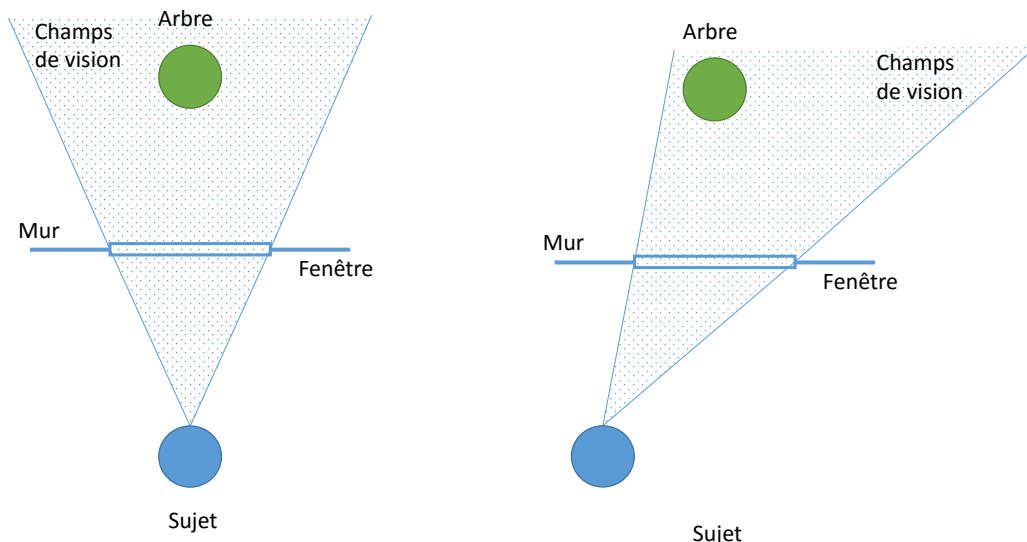


FIGURE 3.1 – Les effets de la parallaxe.

La stéréoscopie seule ne suffit pas à tri-dimensionner une image ; Il est nécessaire de calculer les pyramides de projection fonctions du point de vue du sujet pour connaître les images exactes à afficher. Pour le sujet de gauche, l'arbre sera au centre de la fenêtre vue de face, tandis qu'à droite il sera à gauche dans la fenêtre elle-même en diagonale. Les deux sujets ne doivent pas voir la même image.

3. Un système de localisation des yeux pour fournir l'acquisition des données de localisation au calculateur des pyramides de projection.

Doté de ces trois technologies, les CAVE vont offrir non seulement la stéréoscopie comme on la connaît dans les cinémas, mais également la parallaxe de mouvement qui permet une immersion et un réalisme bien supérieure. Le CAVE IRIS (Immersive Room and Interactive System, figure 3.2) est un exemple de CAVE ultra-haute définition chez Renault.

Comme on peut le voir sur la figure 3.1, chaque mur du CAVE peut se représenter comme une fenêtre vers le monde extérieur virtuel. Les images qui sont projetées sur le mur sont soit des éléments extérieurs, vus à travers la fenêtre, soit des éléments intérieurs, vus devant.

3.2.2 Toucher le virtuel

Les CAVEs permettent d'afficher des environnements virtuels à l'échelle 1, dans lesquels les sujets peuvent se déplacer naturellement et tout cela sans aucun matériel à porter autre que des lunettes stéréoscopiques. Si la magie opère, les sujets veulent immédiatement toucher les objets virtuels pour plusieurs raisons :

- Renforcer la présence en confirmant au cerveau sceptique qu'un objet tangible se trouve bien là, via une seconde perception autre que la vue, qui vient confirmer cette dernière.



FIGURE 3.2 – Le CAVE IRIS de Renault. *IRIS (Immersive Room and Interactive System)* est un CAVE de cinq faces de 3m par 3m affichant plus de 80 millions de pixels au total. Il utilise 18 vidéoprojecteurs en projection indirecte sur des matériaux semi-transparentes, le tout piloté par une vingtaine de cartes graphiques de dernière génération. Le tracking des yeux est réalisé par un système de la société A.R.T.

- Tester les capacités du système, par curiosité et par instinct. Le sujet souhaite connaître au mieux l'environnement dans lequel il navigue pour éviter toute surprise ou danger.
- Interagir avec son environnement comme dans le monde réel.

Les nouveaux utilisateurs sont souvent particulièrement surpris par la qualité graphique des CAVEs. Cela éveille leur curiosité et les pousse à tenter de toucher, pour connaître les limites du système et le comparer avec le réel.

L'hybridation entre virtuel et réel est l'une des caractéristiques propres au CAVE et l'un de ses plus gros atouts. Les sujets présents dans l'environnement virtuel n'ont pas d'occultation du réel, et ont par conséquent une vision normale de tout élément réel introduit dans le CAVE. Entre autres, ils voient leur corps naturellement, ainsi que celui des autres personnes présentes dans le CAVE s'il y en a.

Mais si cette caractéristique peut être considérée comme un point fort des CAVEs, l'intégration de systèmes haptiques révèle deux verrous majeurs.

- Comme décrit en partie 5, la localisation des objets virtuels est parfois imprécise et variable. Mélanger et superposer des objets réels et virtuels pose donc des problèmes de cohérence. Par exemple, la main de l'utilisateur ne touche peut-être pas encore visuellement un objet lorsque le système a déjà pris en compte un contact.
- La vision des éléments réels interdit tout système haptique trop visible et intrusif, qui occulterait l'environnement virtuel. Par souci d'ergonomie, le système doit se faire discret aux yeux des sujets. La plupart des systèmes kinesthésiques étant dotés de structures mécaniques assurant rigidité et retours d'efforts, ils sont peu compatibles avec les CAVEs.

Ces deux problématiques dictent la plupart de nos choix en matière de modalités haptiques dans les CAVEs, puisqu'elles contraignent à la fois la forme du système et ses performances. Les études réalisées dans le cadre de cette thèse explorent particulièrement la première problématique.

3.2.3 Dans l'industrie

Les débuts – Étant parmi les premiers systèmes de réalité virtuelle à avoir proposé des images tridimensionnelles d'une résolution suffisante, les CAVEs ont été rapidement la cible des pôles d'innovation d'entreprise à gros moyens. Initialement, les services de réalité virtuelle ont concerné les industries automobiles et aéronautiques, et plus particulièrement leurs méthodes de conception / maquettage / prototypage numérique. À titre d'exemple, chez Groupe Renault, la réalité virtuelle permet de diminuer le nombre de prototypes physiques nécessaires à un programme véhicule. En fait, plus de prototypes sont réalisés, mais ceux-ci sont exclusivement virtuels, revus et corrigés dans un CAVE sans besoin de façonner un prototype physique coûteux.

Aujourd'hui – Ces systèmes d'affichages se sont généralisés dans les milieux industriels où ils ont été utilisés dès leur débuts. On n'utilise plus seulement des CAVEs multi-faces mais également des *PowerWalls* (qui ne sont que des CAVEs simplifiés, à une seule face), et même des casques qui font l'objet de la section suivante. Le vent souffle d'ailleurs largement en faveur des casques et de leurs contraintes moindres.

Pourtant, il est intéressant de constater que, si les hautes sphères poussent fortement les casques et les nouveaux cas d'usage qui pourraient en découler, les utilisateurs finaux n'ont pas toujours le même discours et les CAVEs ne sont pas bons à enterrer pour autant. Les CAVEs ont encore pour eux la supériorité graphique, l'ergonomie à l'utilisation, la vision de son propre corps, et de nombreux cas d'usage les préfèrent aux casques. À l'inverse, ces derniers ont pour eux la flexibilité, la portabilité et le prix. Pour utiliser un CAVE, un client doit faire une réservation du simulateur, que celui-ci soit disponible, disposer d'un opérateur qui fasse fonctionner le système, etc.

3.3 Head-Mounted Displays (HMDs)

3.3.1 Bref historique

Les casques de réalité virtuelle ont longtemps été utilisés dans des laboratoires, mais sans jamais atteindre des performances exceptionnelles en termes de résolution, définition, temps de latence. Ils étaient très onéreux, souvent lourds et reliés à de nombreux câbles pour brancher les différents écrans qui les composaient à plusieurs cartes graphiques. Cela les rendait peu ergonomiques et donnait un mauvais à priori aux sujets avant même leur entrée dans la simulation.

L'année 2016 a vu l'avènement des casques de réalité virtuelle pour le grand public. Les casques Oculus Rift et HTC Vive (figure 3.3), présentés en grande pompe les années précédentes, ont finalement été commercialisés et offrent pour la première fois des casques un peu plus performants et à prix abordable. L'ouverture au grand public a aussi permis la multiplication des contenus et la croissance du support développeur, ce qui facilite le développement et encourage à créer des casques encore plus performants. Ces nouveaux casques ont été réalisés grâce aux progrès poussés par les smartphones et leurs écrans. La définition



FIGURE 3.3 – Le HTC Vive et ses différents périphériques.

Les deux caméras de tracking dans le fond, les deux manettes d'interaction à l'avant.

s'est largement améliorée, même si elle n'atteint pas encore la limite physiologique de l'œil, et les casques commercialisés en 2016 ont encore une résolution bien inférieure à celle des casques de 2018. Pour finir, les temps de latence ont été considérablement réduits pour diminuer la cinétose, le vrai problème de ses produits.

3.3.2 Un casque d'aujourd'hui

Un HMD est un concentré de technologie et de miniaturisation. Différents sous-systèmes électroniques, parfois facultatifs, en définissent la qualité et les possibilités. Chacun de ces sous-systèmes peut être considéré indépendamment.

1. **Un jeu de lentilles** est utilisé pour guider le regard vers la partie d'écran qui le concerne, et déformer cette partie en un demi champs de vision. Les lentilles permettent d'attendre des champs de vision théoriques assez larges, moyennement une conception complexe pour éviter reflets, déformations et effets de bords. Les jeux de lentilles sont la base du HMD, avec son écran et son bâti, mais certains casques ne possèdent qu'un jeu de lentilles en tout et pour tout (Comme *Homido Mini*).
2. **Un bâti**, ou le corps du casque, permet d'occulter ou non le reste de l'environnement, et de contenir le reste de l'électronique.
3. Le visuel est affiché sur un ou plusieurs **écrans**, intégrés dans le bâti ou déporté. Les écrans utilisés aujourd'hui sont comparables à ceux des smartphones haut de gamme, et atteignent des résolutions variables de (2x1080x1200 pour le Vive ou le Rift, jusque 8K pour certains casques plus récents). La technologie OLED est préférée au LCD, pour des temps de réponse inférieurs et des images dynamiques plus nettes. *Certains casques ne comportent pas d'écran et requièrent l'insertion d'un téléphone portable, comme la famille des Google Daydream-compatibles.*

4. Un jeu de **centrales inertiels** (gyroscopes, accéléromètres) ou de capteurs autres qui permettent la détection des rotations de la tête. *Des capteurs externes (caméras) qui permettent de détecter les translations du casque et de le situer plus précisément dans l'espace sont parfois utilisées en complément. L'ensemble des capteurs sont parfois déportés dans un smartphone inséré en lieu d'écran.*
5. Facultatif : des dispositifs d'interaction aveugle si besoin d'interaction il y a, car le sujet n'a pas de vision précise de ses membres.
6. Facultatif : un système de tracking des membres (de type Leap Motion par exemple) pour recréer un avatar dans l'environnement virtuel.
7. Facultatif : Un dispositif de réalité augmentée pour visualiser le réel dans le casque. *Souvent une caméra frontale, valable si le bâti est occultant.*

Ce sont les avancées effectuées sur tous ces sous-systèmes, principalement grâce à la popularisation des smartphones, qui ont permis de créer les casques que nous connaissons.

3.3.3 En haptique

En raison de leurs performances historiquement en deçà des CAVEs, les HMDs étaient moins utilisés dans le milieu industriel (voire quasiment pas avant 2016). Pourtant, L'occlusion du réel par le casque offre des possibilités bien différentes.

Toucher le virtuel

Lorsque dans un CAVE on ne peut pas introduire n'importe quel matériel qui pourrait être visible et cacher la scène, les casques autorisent à l'inverse l'utilisation de n'importe quels objets, des plus petits aux plus gros ; De toute façon ceux-ci ne sont pas intégrés dans la scène virtuelle qui est la seule à être visible par les sujets.

De nombreuses technologies qui sont impossibles à utiliser en CAVEs trouvent des applications dans les casques qui ont cette contrainte de moins. De plus, le fait que l'utilisateur n'ait aucune vision du principe de fonctionnement du système pendant toute la durée de la simulation diminue les seuils d'acceptabilité des systèmes.

Il est tout de même important de préciser que pour interagir dans un casque, un avatar est nécessaire. Plus de détails sur les avatars sont explicités dans la section 3.4.1.

Synchronisation visuo-haptique

Que seule la scène virtuelle soit visible dans un casque implique que les utilisateurs n'aient pas de visibilité sur leur propre corps. Rappelons-le, c'est l'un des principaux avantages des CAVEs mais qui pose des problèmes de en haptique. Virtuel et réel ne sont pas parfaitement localisés au même endroit, et les objets physiques s'intègrent mal dans une scène virtuelle.

Dans un casque, le sujet ne voit pas ses mains mais seulement un avatar qui les représente. Cet avatar n'est pas parfaitement synchronisé avec la main réelle, en revanche il l'est avec le rendu haptique. Et comme la kinesthésie n'est pas une perception fine ni précise [Fuentes & Bastian, 2010], le cerveau peut plus facilement se laisser prendre à l'illusion. Il est ainsi souvent plus simple d'interagir avec dans un HMD que dans un CAVE, grâce à une meilleure intégration de l'outil d'interaction dans la scène virtuelle.

 **Avantages comparatifs**

La précision haptique dont bénéficient les casques est considérablement meilleure que celle des CAVEs. En remplaçant les objets physiques par des avatars, ils s'affranchissent de tous les défauts visuels évoqués dans le chapitre 5, de profondeur, de vision latérale, ou même de défaut de pyramide de projection : l'avatar de la main est présent dans le virtuel, et est donc également victime de toutes les imprécisions qui y règnent. Cela apporte de la cohérence qui inspire au sujet que tout se passe pour le mieux, et qui fait disparaître la sensation d'imprécisions visuelles. En cas de forte expertise cependant, comme la kinesthésie devient précise suite à un apprentissage, d'autres problèmes peuvent survenir.

Les CAVEs ont pour eux l'atout de l'interaction naturelle et du confort, puisqu'il est bien plus agréable de voir son propre corps et d'interagir directement avec. Ils ont également la qualité graphique, bien supérieure dans ces systèmes grâce à des vidéoprojecteurs chers et encombrants mais performants. L'ergonomie va aussi en leur faveur, puisque les sujets n'ont besoin que de porter de petites et légères lunettes stéréoscopiques.

Système d'affichage	Qualité d'image	Accessibilité	Précision haptique	Possibilité d'intrusion	Ergonomie générale
CAVE	+	-	-	-	+
HMD	-	+	+	+	-

TABLE 3.1 – Tableau comparatif des solutions d'affichage CAVE et HMD

3.4 Technologies et limitations

Le rendu visuel nécessite des techniques avancées de rendu graphique en plus des dispositifs d'affichage. Le rendu d'avatar est parfois nécessaire, et l'aspect photo-réaliste d'une scène doit être travaillé en amont. Enfin, les capacités collaboratives ou interactives requièrent un traitement particulier.

3.4.1 Avatar

 **Citation**

« The human needs some type of representational vehicle to embody his or her being in virtual reality. » Bailenson & Blascovich [2004]

Un avatar est une représentation digitale du sujet et/ou de son comportement. L'avatar d'un sujet doit avoir un comportement pertinent et une apparence affordante pour que ce dernier puisse se projeter spatialement. Ainsi, chaque utilisateur est représenté et agit à travers un avatar présent dans la scène virtuelle [Bailenson & Blascovich, 2004].

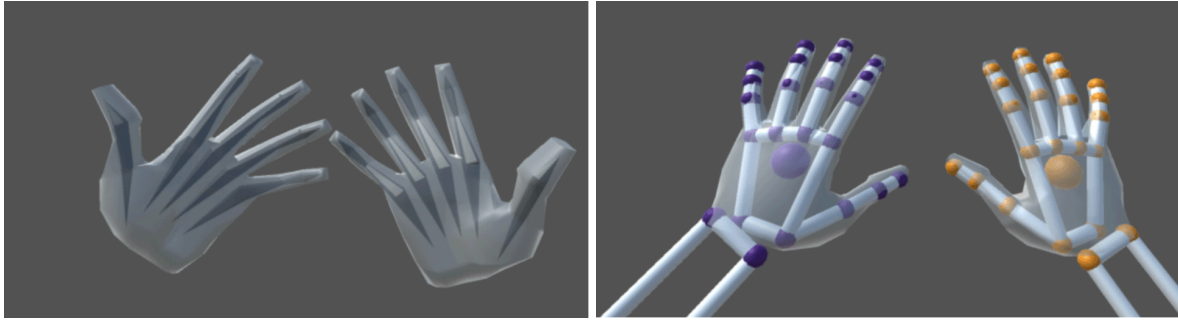


FIGURE 3.4 – Avatars de la main, localisés par un LeapMotion©.

Pour que les avatars soient plus performants, ils sont souvent couplés à un agent. L'agent est l'équivalent algorithmique d'un sujet, il complète les informations fournies à l'avatar pour exécuter certains mouvements ou encore transformer et améliorer les mouvements du sujet [Bailenson *et al.*, 2004]. L'agent interprète la volonté du sujet et enrichit la commande de l'avatar avec ses conclusions pour que le sujet se projette mieux. Les agents vont typiquement reproduire les comportements génériques liés à l'environnement extérieur, comme le vent dans les cheveux (puisque les cheveux du sujet ne sont pas localisés dans l'espace).

Les avatars peuvent prendre différentes formes et reproduire différentes perceptions, il n'est pas nécessaire qu'ils reproduisent un sujet de manière exhaustive. Le téléphone est un exemple très concret d'avatar spécialisé : chacun écoute un avatar auditif de son interlocuteur, plus ou moins réaliste selon la qualité des systèmes et des réseaux, et légèrement modifié par un agent qui consiste en des algorithmes d'amplification et de filtrage du son.

Dans la suite de ce paragraphe, nous étudierons principalement les avatars visuels, symbolisant le corps ou les membres des sujets, comme dans l'exemple de la figure 3.4. Par nature, ces avatars ont plus de sens dans des casques, mais ils sont également présents dans les CAVEs sous forme non visible. Les images de la scène sont calculées pour une caméra qui est un avatar invisible des yeux de l'utilisateur et, si interaction il y a, il doit également y avoir un avatar de la main quand bien même il n'est pas visible (La main réelle est censée remplacer le visuel de l'avatar).

Cohérence spatiale

La cohérence spatiale est à traiter assez spécifiquement en ce qui concerne les avatars, car ceux-ci nécessitent une fidélité spatiale locale maximale sans réel besoin de fidélité spatiale globale.

Globalement – Plusieurs recherches ont prouvé que la fidélité spatiale globale n'est pas nécessaire lors de l'utilisation d'avatar [Lenggenhager *et al.*, 2007; Pavani *et al.*, 2000]. Les sujets sont habitués à se projeter hors de leur corps, et les études n'ont pas relevé de diminution de présence, de performance ou même de temps d'exécution lors de l'utilisation d'avatars déportés. On peut citer deux exemples célèbres :

- La *rubber hand* : le sujet voit sa main remplacée par un avatar réel franchement décalé et s'y identifie tout de même [Botvinick *et al.*, 1998].
- La souris et son pointeur : la souris est l'avatar de la main de chaque utilisateur d'ordinateur, déporté en distance et en angle, mais qui offre d'excellentes performances.

Y compris si l'on change le point de vue du sujet, la localisation (première personne, confondue à celle du sujet, ou troisième personne en vue de dos) n'est pas pertinente et les sujets arrivent tout à fait à se projeter spatialement tant qu'ils gardent de la visibilité sur ce qu'ils font [Mohler *et al.*, 2010]. Il faut cependant plus ou moins d'entraînement.

Localement – La fidélité locale est indispensable. On peut également parler de fidélité comportementale : lorsqu'un sujet bouge un bras, il prédit le mouvement du bras de son avatar et doit le voir bouger en conséquence pour conserver l'immersion [Short & Ward, 2009]. Un avatar dynamique est extrêmement bénéfique à tous points de vue [Mohler *et al.*, 2010], permet d'améliorer la présence ainsi que différentes performances comme la perception des distances.

Tous les aspects et mouvements du sujet n'ont pas besoin d'être reproduits. Seuls les mouvements conscients, volontaires et utiles doivent l'être, tandis que les mécanismes automatiques du corps peuvent être pilotés par l'agent [Bailenson & Blascovich, 2004].

Ressemblance

La cohérence visuelle entre l'avatar et l'utilisateur est un sujet complexe. Des études ont été faites sur les apports d'un avatar photo réaliste par rapport à un avatar plus symbolique [Lok *et al.*, 2003], mais n'en ont pas trouvé l'utilité. Il faut cependant souligner qu'ils utilisaient les HMDs de l'époque, en résolution VGA, et que l'expérience est donc limitée par l'affichage. Dans tous les cas, un avatar trop réaliste posera le problème de la vallée de l'étrange (*The Uncanny Valley*). La courbe d'acceptabilité de l'avatar par les sujets n'est pas monotone. Au-delà d'un certain réalisme, on passe de l'agréable surprise d'un avatar réussi à la déception et le malaise d'un avatar qui ressemble plutôt à un humain cadavérique [Mori *et al.*, 2012]. Il faut donc revenir à la réflexion sur le besoin initial, et se concentrer sur la cohérence comportementale et l'aspect fonctionnel lors de la conception du visuel de l'avatar.

Les avantages à utiliser un avatar

Aux premiers abords, l'introduction d'un avatar dans la scène virtuelle semble lourde à mettre en place. Cela requiert un squelette virtuel texturé et animé, dont les mouvements doivent reproduire exactement ceux du sujet, alors que tout cela peut être évité en utilisant un CAVE dans lequel on voit son propre corps.

L'avatar pour contrecarrer les imprécisions du visuel – Les différents défauts visuels peuvent cependant justifier l'introduction d'un avatar qui n'est pas concerné par le décalage entre réel et virtuel qui survient dans un CAVE. Sans avatar, le sujet voit sa main réelle tandis qu'une main virtuelle invisible, à un emplacement légèrement différent à cause d'imprécisions visuelles, interagit. Selon la valeur des imprécisions, ce phénomène peut s'avérer problématique. Avec un avatar l'utilisateur peut se projeter et être précis dans ses interactions.

De plus, même dans le cas où visuel et physique sont au même endroit, des conflits d'accommodation et de réalisme d'image font que le réel s'intègre mal dans le virtuel. Il est dès lors bien plus facile de se fier à un avatar, lui virtuel et correctement intégré, pour les stratégies d'approche d'objets et d'interactions. L'utilisation d'un gant virtuel (un avatar qui déborde de son analogue physique), d'un outil virtuel ou même d'un ongle virtuel s'avère bénéfique pour les performances et le confort d'utilisation.

D'un autre côté, le couple HMD+Avatar permet directement d'obtenir un environnement totalement virtuel, plus cohérent car dans lequel tous les éléments souffrent des mêmes décalages visuels. Et même si l'avatar n'est pas exactement au bon lieu proprioceptif, on a vu que les sujets se projettent bien à distance dans leur avatar tant que celui-ci répond correctement à leurs mouvements ; l'acuité de la vision est bien supérieure à celle de la kinesthésie [Pavani *et al.*, 2000].

3.4.2 Ombres et lumières

Les ombres et lumières sont les réalisations graphiques parmi les plus exigeantes en technologies et en charge de calculs. Les moteurs graphiques rivalisent sur leur gestion en constante amélioration des ombres, interrélaxions, occlusions amiantes et autres *light probes*.

Ce n'est pas par mode ou pour la simple démonstration technique que les grands acteurs se concentrent sur ces fonctions. Les lumières ont une forte importance dans les rendus photo-réalistes mais sont trop longues à calculer pour le faire en temps réel. L'éclairage a également un grand rôle dans la perception de l'espace et particulièrement de la profondeur.

Ombres portées

Les ombres portées sont un indice de profondeur, d'approche et de contact performant, et de nombreuses études les ont déjà utilisées pour étudier leur apport en réalité virtuelle [Abate *et al.*, 2009; Atkins *et al.*, 2001]. En effet, les dimensions et l'emplacement de l'ombre donnent un indice de localisation et plus particulièrement de proximité, jusqu'au contact entre l'ombre et l'objet qui signifie que la profondeur est nulle. Il est assez simple d'effectuer le rendu de l'ombre portée d'un avatar, voire immédiat si l'illumination globale se fait en temps réel, tandis que l'ombre d'un objet physique (dans un CAVE) nécessite l'ajout d'un avatar invisible et s'expose aux problèmes d'imprécision de la localisation évoqués précédemment.

Occlusions et interrélaxions

Les occlusions ambiantes sont des indices de proximité entre les objets, dont les zones proches s'assombrissent légèrement lorsque l'accès par la lumière est difficile. Même si les sujets n'en sont pas forcément conscients, l'indice de proximité est bien là. Il en va de même pour les interrélaxions, moins significatives dans leur effet selon certains [Hu *et al.*, 2000] ou tout aussi efficaces selon d'autres [Madison *et al.*, 2001].

Les occlusions simples, le fait qu'un objet placé devant un autre occulte le second, peuvent être problématique dans les CAVEs. En effet, aucun objet virtuel ne peut occulter un objet réel, puisque l'objet virtuel est projeté sur un mur qui se situe derrière l'objet réel. Il faut penser à cela lors de la conception de scénarios, pour éviter au mieux les aberrations. Il n'y a pas toujours de solution, et les membres de l'utilisateur (notamment sa main) sont par exemple toujours perçus devant les autres objets par occlusion. Il est nécessaire de minimiser les situations où le cas se présente, car la perception spatiale est alors dégradée par les incohérences de profondeur entre occlusion et vergence oculaire.

3.5 Environnements collaboratifs

Les environnements collaboratifs présentent de nombreux défis supplémentaires. En effet, toutes les technologies évoquées précédemment dans cette partie sont centrées autour du

sujet, seul dans son monde virtuel, et ne tiennent pas compte de la présence éventuelle d'une seconde personne. Les problématiques à résoudre sont nombreuses pour les systèmes d'affichages, et également pour le rendu haptique. Un système de collaboration peut se subdiviser en différents sous-systèmes.

- Un système d'affichage des collaborateurs
- Un système de partage vocal avec les collaborateurs
- Un système d'interactions entre collaborateurs

Remarquons que chacun de ces sous-systèmes met en jeu un sens différent. En particulier, le partage vocal ne pose pas de problème puisque les technologies de son spatialisé sont connues et robustes, tout comme les systèmes de télécommunication vocale en temps réel.

3.5.1 Capacités collaboratives des systèmes d'affichage

La première étape de la collaboration, c'est donc de percevoir les autres collaborateurs.

HMDs – Dans un casque, le réel est totalement occulté. Dès lors que l'on souhaite ajouter un sujet dans l'environnement, cela passe par un avatar artificiellement reproduit dans le virtuel (du virtuel augmenté). Les avatars ne doivent pas être trop précis pour éviter la vallée de l'étrange [Mori *et al.*, 2012], mais suffisamment pour reconnaître le collaborateur ou encore pour interdire toute collision entre plusieurs acteurs.

Les casques n'étant utilisables que par une seule personne, un environnement collaboratif est composé de plusieurs systèmes d'affichage mis en réseau. La charge de calculs graphiques est alors naturellement divisée entre chaque opérateur, et seule la latence du réseau nous différencie des situations à un seul casque. Pour finir un casque peut, à priori, être mis en collaboratif avec un système d'affichage différent.

CAVEs – Les problématiques sont différentes dans les CAVEs, pour lesquels il faut différencier la mise en réseau d'un CAVE avec un autre système ou la présence de plusieurs personnes dans un seul CAVE. Deux situations se posent.

- **Un seul collaborateur par CAVE.** Dans cette situation, le système nécessite d'être mis en réseau. Un CAVE mis en réseau doit, comme un HMD, disposer d'un système d'avatar performant pour télétransmettre l'image du sujet dans le second système d'affichage. Le rendu visuel doit se charger d'afficher le ou les avatar(s) des autres systèmes en réseau, et tenir compte de leurs interactions. Encore une fois, la principale contrainte de l'affichage viendra de la latence.
- **Plusieurs collaborateurs dans un CAVE.** Pour mettre plusieurs personnes dans un même CAVE, il faut qu'une pyramide de vision soit calculée et affichée pour chaque œil de chaque personne. Dans un CAVE classique, deux pyramides sont affichées simultanément pour les deux yeux du sujet. Dans un CAVE à double point de vue, chaque image est affichée à quatre reprises pour les quatre yeux des sujets. La luminosité est alors divisée par 4, puisque chaque œil ne compte que sur la persistance rétinienne pendant $3/4$ du temps (voir figure 3.5). On ignore encore combien d'utilisateurs pourraient être ajoutés jusqu'à ce que l'œil n'ait plus le temps de percevoir les images.

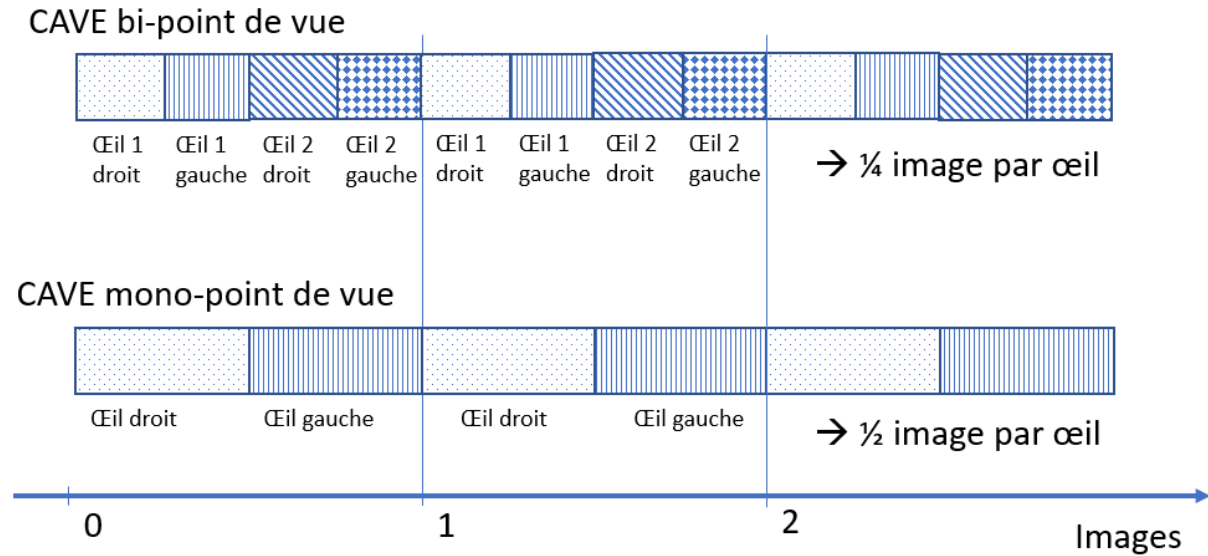


FIGURE 3.5 – Les temps de perceptions des yeux pour un CAVE mono ou bi-point de vue. Sur la base d'un visuel à 60Hz, l'œil a donc environ 4ms pour imprimer l'image sur la rétine, avant 12ms de noir.

3.5.2 L'interaction à la base du collaboratif

Plus que d'haptique, c'est de capacités d'interaction qu'ont besoin les systèmes actuels pour permettre des travaux collaboratifs. Le partage vocal, la manipulation d'objets ou d'IHMs, sont des exemples d'interactions qui peuvent participer à une expérience collaborative.

Coopératif ou collaboratif? – Des systèmes d'affichages en réseau de suffisent pas à faire un environnement collaboratif. Il faut commencer par différencier collaboratif et coopératif : En coopératif, chaque acteur effectue des sous-tâches pour un but commun, tandis qu'en collaboratif les acteurs interagissent entre eux et travaillent sur des tâches communes. En clair, un environnement coopératif ne nécessite que d'afficher le résultat de chacun, alors qu'un environnement collaboratif requiert que chacun des acteurs puisse agir sur et avec les autres.

Pointeur – Lorsque l'on parle de collaboratif, on évoque souvent un trio indissociable : un sujet, un système d'affichage, un pointeur. C'est ce pointeur qui rend le sujet acteur et plus spectateur. La nature du pointeur n'est pas arrêtée et il peut s'agir autant d'un outil que de la main.

C'est vis-à-vis ce pointeur que le rendu haptique est intéressant. Il permet non seulement de préciser, faciliter et guider les actions d'un sujet, mais aussi de ressentir l'environnement et ce que les collaborateurs lui ont appliqué. Tout comme le visuel, le pointeur doit avoir un temps de latence particulièrement minime pour des travaux collaboratifs, et les autres spécificités seront soigneusement choisies en fonction du besoin en matière d'interaction, comme expliqué dans la partie 4.

CHAPITRE 4

DISPOSITIFS D'INTERACTION HAPTIQUE

4.1 Introduction aux dispositifs haptiques

La configuration matérielle est l'un des maillons principaux de la chaîne du rendu haptique décrite figure 2.1, puisque c'est elle qui rend possible l'exécution des rendus en appliquant les consignes calculées par l'algorithmie.

Jex [1988] décrit qu'un système haptique idéal reproduisant des sensations fidèles devrait pouvoir réaliser correctement 4 simulations : un morceau de bois sans vibrations, inertie ou frictions superflues, un arrêt net et brutal, des frottements sans à-coups ou élasticité, et une détente mécanique sans paliers nets et sans latence. Les limitations technologiques actuelles rendent cet objectif bien ambitieux, et d'autant plus si l'on les combine avec les contraintes habituellement liées à l'industrie. Les systèmes haptiques ont déjà des difficultés à rendre une seule de ses fonctions de manière satisfaisante, et sont souvent au stade du symbolique. Ne pouvant recréer la sensation idéale avec fidélité, on tente de proposer d'autres sensations qui fournissent des informations perceptuelles les plus pertinentes possibles. Malgré ces difficultés additionnées et malgré la jeunesse du domaine de la VR, de nombreux systèmes ont été développés au fil des années. Ces dispositifs sont variés, tant dans leur forme que dans leur type de rendu haptique, car beaucoup sont un compromis d'optimisation de certaines caractéristiques au détriment d'autres.

4.1.1 Classifier les systèmes haptiques

Ces larges disparités entre les dispositifs haptiques rendent nécessaire un tri selon certaines caractéristiques pour identifier celui qui répondrait le mieux à tel ou tel besoin. Toutes les caractéristiques suivantes importent, c'est pourquoi on peut, selon le besoin, effectuer un tri suivant l'une ou l'autre de celles-ci ; le système idéal n'existe pas, et on cherche le meilleur compromis de certaines performances qui doivent correspondre à un cas d'usage précis.

- Séparer les **dispositifs cutanés et kinesthésiques** semble la méthode de tri la plus évidente. Peu de systèmes produisent les deux types de retour, et ceux-ci sont souvent la combinaison de sous-systèmes comme étudié par Kheddar *et al.* [2004].

- Un tri suivant **les degrés de liberté** donne une classification similaire à la précédente, en considérant les dispositifs cutanés comme n'ayant aucun degré de liberté à l'effort. Bien différencier les degrés de libertés spatiaux et les degrés de liberté à l'effort, parfois différents.
- Certains systèmes sont dits à **impédance**, avec l'acquisition de la position et une réponse en effort, et des systèmes à **admittance**, avec l'acquisition de l'effort et une réponse de position [Salisbury *et al.*, 2004].
- Les systèmes à **outil** ou à **interaction naturelle** forment également deux groupes bien distincts. L'utilisation d'un outil permet de se libérer de tout besoin cutané tout en limitant la kinesthésie à l'exercice d'efforts sur un seul point, le Haptic Interaction Point (HIP) [Basdogan & Srinivasan, 2002].
- La différenciation peut se faire par **le champ d'action**. Certains systèmes n'autorisent qu'un tout petit espace, tandis que d'autres permettent un environnement plus grand voire illimité pour les *wearables* sans fils.
- On peut aussi séparer les systèmes selon leur **compatibilité avec les systèmes d'affichage** (CAVE ou HMD). La question ne se pose pas tant pour les casques, qui autorisent la plupart des dispositifs, mais plutôt pour les CAVEs qui sont limités aux systèmes peu intrusifs.
- Pour finir, il existe certains systèmes déjà commercialisés et d'autres plus expérimentaux ou existants seulement à titre de démonstration technologique. On peut appeler ce critère **l'industrialisabilité**. La différenciation se fait souvent sur de l'ergonomie, de la robustesse et de l'utilisabilité.

Dans la suite, on triera les systèmes selon que leur rendu est cutané ou kinesthésique, tout en tenant compte de leurs autres différences, ajoutées à certaines caractéristiques qui pourront s'avérer pertinentes : l'inertie, la friction, la résolution, l'intervalle d'effort, l'impédance ou l'admittance, etc.

Il faut garder à l'esprit qu'aucun système n'a aujourd'hui des performances équivalentes à celles qu'ont les systèmes d'affichage pour la vision. Il n'y a pas encore pas si longtemps, on s'émerveillait devant les premières images de synthèse et leurs systèmes d'affichage, qui sont devenus aujourd'hui une vraie banalité, comme l'évoque Salisbury *et al.* [2004]. On peut espérer que le processus de progrès technologique se reproduise aussi rapidement avec l'haptique.



Citation

« As in the days when people were astonished to see their first wire-frame computer-generated images, people are now astonished to feel their first virtual object. » Salisbury *et al.* [2004]

Rendu multisensoriel

Citation

« The limitations of haptic devices in their capacity to provide the range and bandwidth of forces necessary to match the perceptual capabilities of the human haptic system have led to the exploration of multisensory displays as a means of compensating for haptic device limitations. » [Lederman & Jones, 2011]

Pour pallier au manque de performances des dispositifs haptiques, on ajoute d'autres perceptions plus aisées à implémenter, visuelles ou auditives par exemple. Ces substitutions, détaillées dans la partie 2.2, permettent d'augmenter artificiellement la quantité d'informations fournies au cerveau et ainsi de rendre ces informations plus robustes. Tous les systèmes utilisés dans les simulateurs peuvent participer aux compléments multisensoriels, à commencer par le système d'affichage du visuel, souvent performant.

Les substituts et compléments sensoriels sont un bon moyen de diminuer les coûts des simulateurs et/ou de les rendre plus performants que s'ils ne se contentaient que de reproduire au mieux le réel.

4.1.2 Problématiques industrielles

Dans un contexte professionnel, de nombreuses contraintes qui n'ont pas de lien direct avec la performance haptique se manifestent. Si l'on souhaite que ces dispositifs passe du statut de recherche fondamentale à celui de recherche appliquée et deviennent de réels outils industriels, il devient nécessaire de se plier à ces contraintes supplémentaires.

- La fiabilité des système doit être irréprochable. Par fiables on n'entend pas seulement robustes et répétables, ils doivent aussi inspirer confiance à des ingénieurs qui doivent avoir foi dans les choix qu'ils font lorsqu'ils utilisent le système. Cela implique la prise en compte des nombreux facteurs psychologiques détaillés dans la partie 2.1.3, mais aussi un minimum de bogues et contraintes d'utilisation.
- La fidélité des retours doit aussi être au rendez-vous. Contrairement à d'autres applications de la réalité virtuelle, les applications industrielles ou de recherche appliquée n'autorisent pas de tromper les sens comme on le souhaite. Les cotations des reproductions virtuelles doivent être respectées, les retours d'efforts doivent se produire à des profondeurs exactes, il ne suffit pas d'imiter la perception du réel mais bien le réel même. Par exemple, on ne pourra pas grossir les objets sous prétexte qu'ils sont perçus trop petits, leurs dimensions doivent être les bonnes.
- L'ergonomie de ces systèmes est un aspect critique. Loin de seulement dégrader la perception subjective du système par ses utilisateurs, une bonne ergonomie est indispensable à une simulation performante, avec présence et immersion. Les industriels n'ont pas envie de, comme ils disent, *se déguiser en extraterrestre*, et s'équiper ou se calibrer peut demander du temps et de la patience que les utilisateurs n'ont pas forcément. Les compétences requises doivent être faibles, et le système doit s'effacer derrière son usage.
- Pour finir, il y a également quelques problématiques légales. La sécurité des systèmes doit être assurée, les données récupérées sur des utilisateurs (par exemple morpholo-

giques) doivent être confidentielles et demandent des démarches complexes pour être seulement collectées en respectant la loi et les usagers.

4.2 Les dispositifs à rendu cutané

Le rendu cutané offre une signification précise et efficace de l'instant de contact au sujet, même s'il n'empêche pas la pénétration. Il permet aussi la perception des textures et de la rugosité ou encore de la température. S'il y a utilisation d'outils réels dans l'environnement virtuel, le rendu cutané est superflu car il est rendu directement par l'outil.

Les systèmes décrits ci-après peuvent être divisés en deux catégories. Les systèmes *wearable*, qui seront attachés à la main de l'utilisateur, incluent notamment les dispositifs vibrotactiles. Les systèmes *on the air*, sans contact, ne nécessitent aucun équipement particulier porté par l'utilisateur.

4.2.1 Les systèmes vibrotactiles

Les dispositifs vibrotactiles sont les plus simples, accessibles et répandus parmi tous les systèmes de rendu haptique que nous décrirons dans ce chapitre. Ils sont *wearable*, c'est-à-dire qu'ils sont simplement portés par l'utilisateur, comme beaucoup d'autres technologies que nous verrons plus tard dans ce chapitre. La technologie vibrotactile est plus détaillée que les autres du fait de sa pénétration plus importante dans le marché.

Les dispositifs vibrotactiles sont apparus de façon grossière avec les vibreurs de téléphone portable ou les manettes de consoles de jeux [Tremblay & Yim, 2000], puis de plus en plus précisément avec les écrans des smartphones qui vibrent parfois au contact du doigt pour simuler des clics de boutons. Au fil des années, ces rendus sont passés de l'état de vibrations simples à celui de réels clics peu discernables d'un clic mécanique, notamment suite à l'escalade de progrès technologiques apportés par les smartphones (Apple Taptic Engine [Hill, 2014]). Ces systèmes fonctionnent au moyen de moteurs linéaires et d'un contrôle électronique précis, et sont souvent portables ; Ainsi, on peut les utiliser presque indifféremment dans des CAVEs ou des HMDs.

Matériel

Aujourd'hui, il existe de nombreux gants équipés de vibrotactile sur le marché. La société Cyberglove Systems fait office de précurseur, avec le système CyberGlove+CyberTouch qui associe tracking des doigts et retour vibrotactile par moteur à excentrique depuis déjà 20 ans. On voit ce gant sur la figure 4.1. Les imposants moteurs à excentriques sont placés au-dessus de chaque doigt, avec un moteur supplémentaire pour la paume de la main.

Les actionneurs des gants d'aujourd'hui ont un comportement plus fin que celui des moteurs commandés en puissance d'antan. On peut utiliser des moteurs linéaires comme vu plus haut, mais aussi des solénoïdes ou encore des actionneurs piézoélectriques. Des outils plus performants de contrôle des actionneurs se sont également développés, comme le contrôleur low-cost DRV2605 de Texas Instrument qui permet de piloter facilement des moteurs linéaires ou à excentrique avec des microcontrôleurs basiques type PIC ou Arduino et de leur faire produire toutes sortes de réponses différentes préprogrammées.



FIGURE 4.1 – Le gant CyberGlove doté du système CyberTouch.

Type de retour des gants – Le placement des vibreurs change radicalement le type de retour que l'on recherche. Il y a plusieurs possibilités.

1. Placer les vibreurs contre la pulpe des doigts simule la sensation cutanée induite par un toucher standard, mais la peau est toujours en contact avec quelque chose y compris en mouvement libre. On essaie de reproduire un retour réaliste, la sensation cutanée étant localisé sur le lieu de toucher.
2. Placer les vibreurs du côté des ongles permet de laisser les doigts au naturel, sans contact superflu, mais pas de reproduire de sensation cutanée. Cette configuration tient plutôt du domaine de la substitution sensorielle symbolique, car la vibration est déportée du lieu de contact.

Les dispositifs qui ne se placent pas sur les mains ont également tout intérêt à bien étudier le placement de leurs vibreurs pour reproduire au mieux les modalités haptique dont ils ont besoin.

Commande des actuateurs

La commande des actuateurs électriques est presque aussi importante que ceux-ci. En effet, c'est la commande qui, en tenant compte de la nature de l'actuateur (moteur, piézoélectrique...), lui applique la consigne correspondante au besoin en matière de toucher. L'idéal serait de faire varier la fréquence et l'amplitude des signaux [Murray *et al.*, 2003] pour obtenir la meilleure qualité de toucher, mais il n'est parfois possible de faire varier que la tension d'alimentation continue, et donc l'amplitude seule [Lindeman *et al.*, 2002]. On

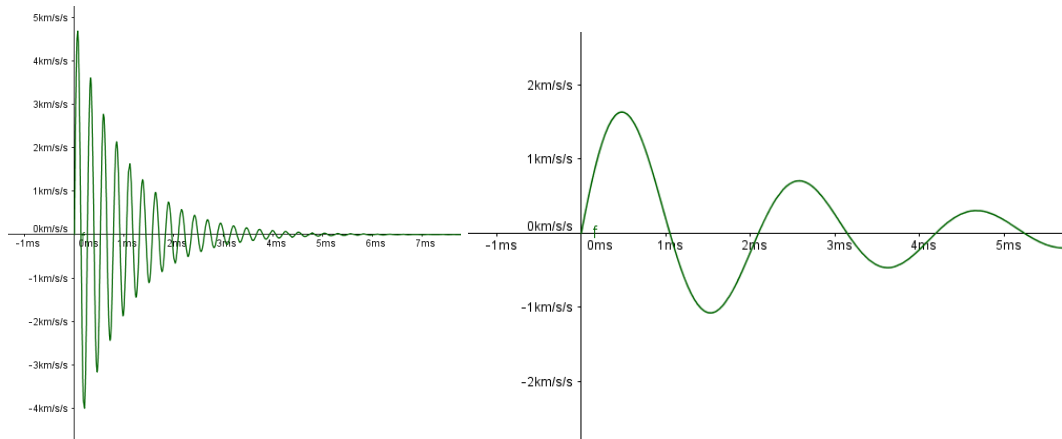


FIGURE 4.2 – Quelques exemples de formes d’ondes [Wellman & Howe, 1995] : Aluminium à gauche, plastique à droite. L’amplitude, la fréquence mais aussi la vitesse de décroissance sont différents.

obtient tout de même des résultats concluants, surtout par rapport à l’application d’une simple consigne uniforme avec marche/arrêt (ce qui se fait encore malheureusement bien souvent).

Formes d’ondes – La consigne se manifeste par une forme d’onde, dont des exemples sont fournis figure 4.2.1. La fréquence des formes d’ondes dépend de l’effort, de la vitesse de collision et du matériau [Okamura *et al.*, 1998]. Elle est modulée par plusieurs fréquences pour optimiser le signal, souvent de manière empirique. Des études ont tenté de déterminer expérimentalement les caractéristiques principales des formes d’ondes classiques d’un retour cutané [Wellman & Howe, 1995], et ont identifié l’équation suivante dont les composantes sont décrites ci-après.

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt} \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$Q(t)$ est la forme d’onde complète d’une vibration. La première composante $A(v)$ représente l’attaque. Vient ensuite une sinusoïde en décroissance exponentielle de facteur de décroissance B et de pulsation ω en radian/sec.

Le facteur d’attaque A est proportionnel à la vitesse de l’attaque et sa fréquence augmente avec la raideur des matériaux. B est déterminé empiriquement pour correspondre à la décroissance de l’enveloppe de la forme d’onde.

Optimisations des formes d’ondes – Certaines optimisations technologiquement éprouvées ne sont pas toujours utilisées dans les processus vibrotactiles. Elles permettent pourtant d’améliorer artificiellement la latence ou même la résolution au niveau des actionneurs [Martinez *et al.*, 2016]. Même si ces artifices éloignent la forme d’onde théorique de la forme d’onde réelle, l’objectif est le toucher perçu final.

- La Pulse Width Modulation (PWM) permet d’ajouter une surcouche de régulation de tension des moteurs par dessus tous les autres algorithmes. C’est possible grâce à l’inertie des moteurs, qui ne s’arrêtent pas si on leur soumet un créneau en PWM qui ne les alimente qu’une fraction d’un cycle court. Le signal est ainsi réduit à sa

valeur moyenne. Au-delà de faire varier l'intensité du signal, cela peut permettre d'augmenter la résolution du système : si un toucher a lieu entre plusieurs moteurs, Ils peuvent tous s'activer en voyant leur tension inversement pondérée par la distance au lieu du toucher. Ainsi, on peut presque avoir la continuité spatiale des retours haptiques.

- On peut diminuer le temps de latence de départ dû à la durée d'accélération des moteurs en leur exerçant une pulsation initiale plus élevée.
- De manière parallèle, on peut diminuer la latence d'arrêt due au temps de freinage des moteurs en leur appliquant une tension opposée à leur consigne normale (Reverse Breaking) pendant une durée brève.

Toute la difficulté réside dans le rendu d'un toucher suffisamment puissant et complexe pour être efficace ou réaliste, mais qui ne soit pas perçu par le sujet comme actif : les matériaux doivent être perçus tels qu'ils sont, c'est-à-dire inertes le plus souvent.

Performances du vibrotactile

Les systèmes vibrotactiles, malgré leurs qualités, sont encore loin d'être parfaits et possèdent de nombreux défauts. L'absence de retour kinesthésique est un manquement important, qui autorise la pénétration des solides virtuels de façon bien peu réaliste.

Bénéfices et limites des vibreurs – Si l'utilisation de vibrations simples (linéaires) est considérée comme peu déterminante, les formes d'onde plus complexes ont un réel apport et les sujets différencient même au moins 5 rigidités différentes [Galambos, 2012]. Le vibrotactile devient dès lors un vecteur de perception et d'information supplémentaire, qui ne surcharge pas l'environnement.

Il y a cependant quelques défauts spécifiques au vibrotactile. Par exemple, la répétabilité du positionnement des actuateurs est faible. Au moindre mouvement, ceux-ci risquent de bouger et de ne plus être placés contre la peau avec la même pression ou la même surface de contact ; la perception des vibrations est dès lors variable. De plus, quel que soit le placement du vibreur, son contact est effectif y compris lorsqu'il n'y a pas de toucher virtuel et, même si les mécano-récepteurs s'adaptent temporellement à la situation, les sensations d'absence de toucher sont dégradées. Le matériau a lui aussi une influence sur le rendu, et les sujets ne perçoivent pas deux vibrations identiques de la même façon si la matière en contact avec leur peau n'est pas identique d'une expérience à l'autre [Brown & Kaye, 2007].

Nombre d'actuateurs – Une des faiblesses des gants vibrotactiles réside dans leur incapacité à reproduire une perception spatialement continue comme le fait la peau. Les stimuli sont localisés sur certaines parties, par exemple la pulpe des doigts, tandis que le reste de la main demeure libre de traverser des solides virtuels sans aucun retour haptique. Lors d'actions de manipulation et de préhension d'objets, le manque de retour le long du doigt se fait alors cruellement sentir.

Le problème du positionnement et du support – Les larges différences de perception vibrotactile en fonction du positionnement du vibreur sont souvent évoquées mais rarement étudiées dans la littérature. En effet, le ressenti de la vibration peut varier :

- En fonction de sa position sur la peau.

Forces	Faiblesses
Grand portée (système portatif) Rendu cutané riche Coût faible	Équipement supplémentaire pour l'utilisateur Aucun rendu kinesthésique Nécessité de tracking additionnel

TABLE 4.1 – Pros et cons des gants vibrotactiles.

- En fonction de la pression exercée entre le vibreur et le corps du sujet, l'intensité de la vibration varie énormément. Certains vibreurs peuvent tout simplement ne pas vibrer lorsque l'on leur applique une pression trop forte.
- En fonction de son attache au corps. La rigidité du support, son mode d'attache au vibreur, et son mode d'attache au corps sont autant de paramètres importants. La vibration ne va pas malheureusement se diriger uniformément vers le doigt du sujet, mais peut se diffuser entièrement dans le support avant de rejoindre le corps en un autre point et de donner l'illusion que le vibreur est en fait placé là.

Ces trois problématiques, additionnées au fait que les vibrations engourdissent le système de perception haptique, sont la cause de fortes variabilités dans la perception spatiale de la notification. Le sujet ressent une vibration, mais il ne se rend pas forcément compte qu'elle est appliquée seulement sur la pulpe d'un doigt. Parfois, il est impossible de savoir d'où vient la vibration alors que tout le doigt vibre, ce qui peut être, selon les cas, un avantage ou un inconvénient.

Vibrations symboliques – Il existe également des systèmes de vibreurs qui ne rendent pas simplement une imitation du cas réel. Le VibroTac de SensoDrive© est un bracelet vibrant qui peut reproduire toutes sortes de formes d'ondes et de schéma de vibrations autour du poignet, tandis que HapRing [Nunez *et al.*, 2015] est un petit anneau vibrant qui fonctionne avec le contrôleur haptique DRV2605L de Texas Instrument. De même, les modalités de type *sonar*, qu'elles soient appliquées au doigt ou au poignet, donnent des indices non-réalistes graduels de profondeur et de proximité aux objets.

4.2.2 Les autres systèmes portables (*Wearables*)

Il existe de nombreuses solutions comparables aux systèmes vibrotactiles qui permettent de reproduire un rendu cutané ou une substitution du même genre. On trouve notamment :

- Des systèmes pneumatiques de coussinets sous pression, placés par exemple sous les dernières phalanges, qui se gonflent au moment du toucher.
- Des systèmes de bobines à enroulement [Minamizawa *et al.*, 2007]. Deux bobines, situées de part et d'autre d'un doigt, sont reliées par un ruban qui passe sous le doigt. Lors de l'alimentation des bobines, le ruban se tend et presse le dessous du doigt.
- Des systèmes complexes de rendu haptique cutané, basés sur les vibrations, la pression et le pseudo-haptique, qui permettent souvent un meilleur rendu des textures. Les

systèmes GoTouchVR¹ et Tactai [Gaudiosi, 2017] sont des wearables particulièrement prometteurs et commercialisé prochainement.

- Des systèmes à aimants [Weiss *et al.*, 2011]. Les bouts des doigts sont couverts de petits électro-aimants, et d'autres sont placés sous la surface à toucher. L'activation des bons aimants se fait en conséquence d'un toucher.
- Des systèmes à mémoire de forme qui, grâce à un chauffage piloté, peuvent reprendre certaines positions. Certains dispositifs de ce type, basés sur le changement de structure cristalline entre martensite et austénite, ont été jugés convaincants [Scheibe *et al.*, 2007].
- Des systèmes chauffants peuvent produire un rendu de proximité plutôt que de contact.

4.2.3 Les dispositifs d'haptique sans contact

Des dispositifs d'haptique sans contact ni contrainte d'objet à porter ont été développés plus récemment. Ces systèmes sont encore hautement expérimentaux et non utilisables en l'état, mais ont l'avantage d'apporter un léger retour kinesthésique en plus du ressenti cutané. On peut les séparer en deux grandes familles.

Les systèmes à jet d'air

Ces dispositifs exercent un rendu haptique en projetant un jet d'air vers la main ou l'organe visé. L'effort est celui de l'air et est donc plutôt léger, et il est difficile d'en faire un outil fin et précis, ni encore rapide. Très sensibles au vent mais aussi aux obstacles, ils nécessitent un environnement dédié. Plusieurs systèmes de ce type ont vu le jour récemment.

Les jets d'air continus – Ils constituent la solution la plus évidente. Il s'agit de piloter un ou des becs d'expulsion d'air pour qu'ils envoient le bon jet au bon endroit et au bon moment [Tsalamlal *et al.*, 2014].

Les jets d'air sont soigneusement étudiés : la forme du bec, la puissance du compresseur, la largeur du faisceau et son mode de turbulence initial sont autant de paramètres dont l'influence est considérable. La portée du faisceau est un compromis entre un toucher précis, de qualité, localisé, mais à courte distance (environ 150 *mm*), et un toucher moins précis, moins fort mais sur une zone plus large et pour une portée supérieure (jusqu'à 450 *mm*).

Les sensations offertes par ces dispositifs ne sont ni fines, ni robustes, ni d'une amplitude particulièrement avantageuse [Suzuki & Kobayashi, 2005]. Mais elles ont le mérite d'être délivrées, et en continu.

Les tourbillons toriques ponctuels (*Vortex rings*) – Ils se présentent comme une solution alternative discrète. La forme torique permet au jet d'air de conserver sa vitesse et sa stabilité plus longtemps dans les airs, même si en contrepartie aucun rendu continu n'est possible. Encore une fois, il faut robotiser le bec d'expulsion d'air et le commander avec précision en temps réel.

Ces systèmes ont aussi l'avantage d'être théoriquement abordable, avec par exemple le système Aireal de *Disney Research* [Sodhi *et al.*, 2013] que l'on voit figure 4.3, dont certaines

1. <https://www.gotouchvr.com/>

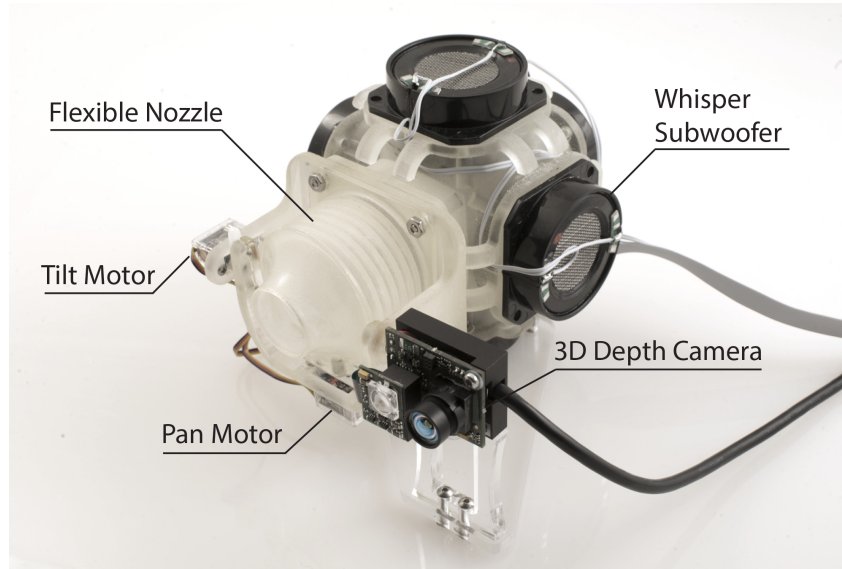


FIGURE 4.3 – Un système *AIREAL* de Disney Research [Sodhi *et al.*, 2013].

pièces sont simplement imprimées en 3D avec du plastique bon marché. Une commercialisation n'est cependant pas envisagée pour l'instant.

Les efforts engendrés sont à nouveau légers [Gupta *et al.*, 2013] : $180N$ à $1m$, ou $90N$ à $2,5m$, le tout pour une résolution spatiale d'une dizaine de centimètres, révisée selon la distance. Les sujets évoquent le même ressenti que si un papillon se posait sur leur main. Mais la latence est aussi un vrai problème : le tourbillon d'air décélère rapidement au cours de son trajet, et on peut atteindre quasiment une demi-seconde de délai pour des contacts à $2,5m$, Un délai suffisant pour que le doigt ait bougé avant que le rendu haptique n'arrive jusqu'à sa cible.

Malgré leurs défauts et leurs compromis, ces appareils ont un espace d'utilisation large et offrent un retour kinesthésique faible mais existant. Ils ne sont pas encore ni commercialisés ni même en développement précédant une commercialisation, mais les technologies restent à suivre.

Les systèmes à variations de pression acoustique

Les systèmes à variation de pression acoustiques ont beaucoup fait parler d'eux assez récemment. Le premier système [Iwamoto & Shinoda, 2008] pouvait générer un point focal fixe grâce à 91 transducteurs, et son évolution [Hoshi *et al.*, 2010] était à même de faire bouger le point focal avec 324 transducteurs. Aujourd'hui, le dispositif *UltraHaptics* [Carter *et al.*, 2013] commence même à être commercialisés dans les laboratoires (figure 4.4).

Ces systèmes fonctionnent grâce à un effet non linéaire des ultrasons, la pression des radiations acoustiques. Ils sont composés d'une matrice de transducteurs qui émettent chacun un signal d'ultrasons, dont la phase est commandée de manière à synchroniser les pics de pression en des points focaux précis.

Les efforts sont alors déterminés selon l'équation 4.2 [Hoshi *et al.*, 2010] :

$$F = \frac{\alpha}{\rho c} \int_{-w_f/2}^{w_f/2} \int_{-w_f/2}^{w_f/2} \frac{p(x_0, y_0)^2}{2} dx_0 dy_0 \quad (4.2)$$

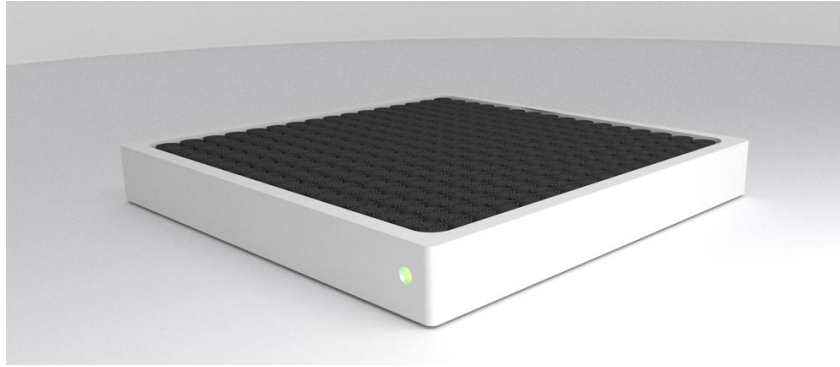


FIGURE 4.4 – Le kit d'évaluation *UltraHaptics*

avec

- F représente l'effort total.
- $\alpha = 1 + R^2 \approx 2$ car le R^2 (coefficient de réflexion du doigt) est environ égal à 1, c'est-à-dire que l'onde est presque totalement réfléchie.
- ρ est la densité du milieu.
- c est la célérité de la lumière.
- $p(x_0, y_0)$ est le champ de pression sonore généré par les ultrasons.
- w_f est le diamètre du point focal.

Efficacité – À l'heure actuelle, ces systèmes ne peuvent reproduire qu'un effort faible, de l'ordre du gramme en équivalent poids. De plus, l'effort maximal diminue en fonction du nombre de transducteurs sollicités et est rapidement plus difficile à percevoir. Il est également important de garder à l'idée que les signaux continus sont moins bien détectés par les mécano-récepteurs qui s'adaptent, et l'on détectera plus facilement des taps et des clics plutôt qu'un toucher prolongé.

La bande de fréquence des sons émis par ces dispositifs est large et l'amplitude dépasse les seuils de sensibilité des mécano-récepteurs de la main, tandis que la résolution spatiale est d'une vingtaine de millimètres.

Le volume utile se limite à une portée verticale d'une vingtaine de centimètres. Le système peut donc être intégré à l'environnement mais doit rester dans un environnement proche ; dans un CAVE, il est compliqué à camoufler. Ce type de dispositif se prête par contre tout à fait à écrans flottants [Monnai *et al.*, 2014] ou aux interactions tactiles aveugles qui nécessitent des indices haptiques en amont du contact. Par exemple, on peut intégrer une technologie semblable derrière la console centrale d'un véhicule automobile, comme l'a fait BMW.

Pour finir, les systèmes révèlent une dernière problématique de sécurité. Les ultrasons, bien que peu audible par l'oreille humaine, dépassent le seuil de douleur théorique de l'ouïe. En revanche, l'effort mécanique engendré est sans danger dans son intensité actuelle.

Forces	Faiblesses
Non intrusifs et interaction naturelle	Intrusif par sa faible portée (pour certains)
Rendu de textures	Efforts minimes
Ergonomique	Stade expérimental
	Bruit

TABLE 4.2 – Pros et cons des dispositifs d’haptique sans contact.

4.3 Les dispositifs à rendu kinesthésique

Bien plus complexes à implémenter, les dispositifs à rendu kinesthésique sont souvent plein de compromis. En effet il est bien difficile de produire de gros efforts à longue distance, d’autant plus si le système doit être non-intrusif et avoir un champ d’application large. Les produits existants sont variés, tant par leur technologie que par leurs possibilités, et ont des contraintes différentes des systèmes précédents.

Leur premier objectif est de reproduire la gamme d’efforts qui leur est demandée, de façon précise et sans instabilités. Or, ce premier critère est déjà bien difficile à contenter et bien peu de systèmes produisent l’effort suffisant, à la fréquence correcte et de façon stable et uniforme.

Ensuite, le système ne doit pas ajouter d’efforts (impédance nulle) ni gêner l’utilisateur dans ses mouvements (comme tout autre dispositif haptique par ailleurs). On parle de transparence kinesthésique.

Pour finir, les contraintes habituelles d’ergonomie, d’intrusivité minimale, de coût ou encore de champs d’application s’appliquent.

Pour des raisons pratiques, ces dispositifs sont le plus souvent suppléés d’un mode de localisation qui permette de lier finement les retours d’effort à la position.

4.3.1 Les bras haptiques et les exosquelettes

Cette section regroupe tous les appareils robotisés qui vont, d’une façon ou d’une autre, contraindre les mouvements d’un outil. Ce type de système se prête le mieux à la simulation de rendu kinesthésique et de contact dur, mais n’est pas exempt de défaut. Reproduire les efforts de résistance d’objets fixes nécessite un système précis et pouvant reproduire un large panel d’effort à haute fréquence. Ces systèmes sont souvent limités par leur champ d’action assez faible (mis en compromis avec leur rigidité), leur impédance non nulle accompagnée par de l’inertie et beaucoup de frottements qui masquent les retours d’efforts plus fins. Comme schématisé sur la figure 4.5, ils ne peuvent pas exercer un effort nul lorsque nécessaire ni atteindre les efforts maximaux habituellement exercés par les utilisateurs. Pour finir, leur ergonomie est souvent en retrait, leur latence difficile à diminuer, et ils sont intrusifs.

Il existe deux grandes familles de solutions.

Les bras haptiques – Ils sont constitués d’une chaîne de segments liés entre eux par des articulations motorisées. La base est liée à un bâti fixe, tandis qu’au bout de la chaîne

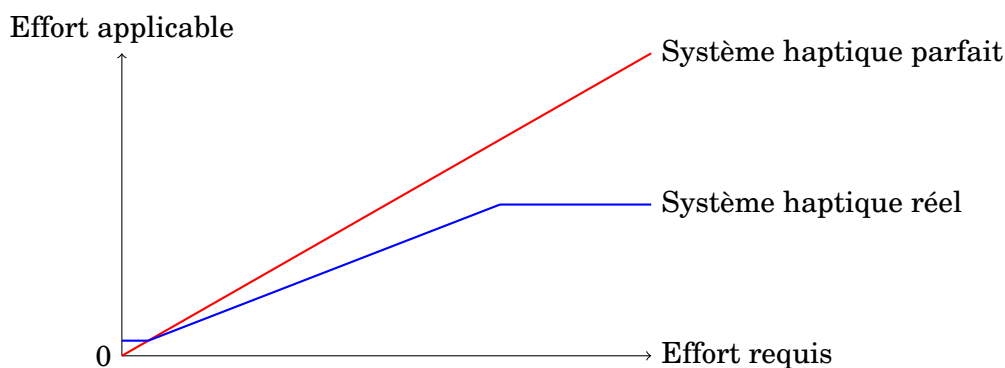


FIGURE 4.5 – Courbe caractéristique qualitative des efforts possibles à exercer par un système kinesthésique. *Les systèmes réels actuels ne peuvent pas exercer un effort totalement nul lorsque c'est nécessaire du fait de leur masse et de leur inertie. Également, ilsaturent au-dessus d'une certaine consigne.*



FIGURE 4.6 – Le PHANTOM Omni de SensAble Technology, inc et le Virtuouse 6D de Haption. *Ces appareils dotés de 6 degrés liberté sur un outil pointeur ont su démocratiser l'usage des bras haptiques. Le PHANTOM Omni offre une résistance de presque 1N en continu, et un peu plus de 3N ponctuellement selon la position de l'appareil.*

on trouve souvent un outil générique ou un système d'attache au corps. Ces bras incluent souvent un système de tracking (par jauges de contraintes, centrales inertielles ou encore par codeurs incrémentaux), mais l'accumulation des erreurs justifie l'utilisation d'un tracking externe indépendant des repères locaux approximatifs.

Les bras haptiques et exosquelettes doivent obéir à des contraintes de conception strictes. Pour des soucis de résonance et de vibration, la fréquence de rafraîchissement doit être au minimum d'1Khz. Beaucoup de recherches se sont consacrées à optimiser, souvent avec succès, les algorithmes de vibration qui rendent le toucher plus réaliste [Okamura *et al.*, 1998, 2001]. Attention cependant, la commande doit être conçue avec attention pour qu'un solide virtuel passif ne soit pas perçu comme actif par l'utilisateur ; pour cela, l'impédance du système doit être minimales et les démarrages / arrêts de ses moteurs doivent être pilotés finement, et des commandes simplement linéaires ne sont généralement pas satisfaisantes [Salisbury *et al.*, 1995].

La famille des Phantom Omni (désormais appelés Geomagic Touch, en photo figure 4.6) a été un grand succès pour ce type de produit et pour l'haptique en général grâce à un coût



FIGURE 4.7 – À gauche le MANDARIN conçu en collaboration entre le CEA, Haption, INRIA, Renault, et l'ANR. À droite le Dexmo, conçu par Dexta Robotics [Gu et al., 2016]. Ces exosquelettes se fixent sur la main et en contraignent les phalanges grâce à des articulations mécaniques, ajoutant même parfois un retour cutané au bout des doigts.

assez bas. Ils ont permis de démocratiser cette technologie dans de nombreux laboratoires, en attendant des dispositifs plus performants, et de beaucoup progresser dans la recherche sur l'haptique.

Les exosquelettes – À la différence des bras haptiques, les exosquelettes ne basent pas leur repère de coordonnées sur le repère d'un bâti. Ils sont liés, comme leur nom l'indique, au squelette, dont ils reproduisent plus ou moins la structure, et le contraignent grâce à des articulations motorisées. Le repère est local (à moins d'une base fixe) et doit donc à priori forcément être secondé d'un système de localisation pour détecter les collisions.

Un exosquelette peut tout à fait se combiner avec un bras haptique pour obtenir le meilleur des deux mondes, comme avec le système CyberForce® de CyberGlove Systems. De dimensions et fonctions variées, ils peuvent contraindre tout le bras, ou ne s'occuper que des doigts comme le font les deux systèmes de la figure 4.7.

Actuateurs

Ces systèmes peuvent être motorisés par plusieurs types d'actuateurs, présentant chacun leurs avantages et leurs inconvénients.

- Les actuateurs électriques sont parmi les plus utilisés. Ce sont majoritairement des micromoteurs, qui peuvent exercer des forces déjà importantes et qui s'améliorent d'année en année. Les moteurs électriques sont variés tant en coûts qu'en performances, et conviennent à de nombreux systèmes grâce à leur compacité, leur discrétion et à la simplicité de leur commande.
- Les actuateurs hydrauliques sont plus onéreux et plus lourds à mettre en place, mais ont un comportement puissant, précis et souple. Leur principal avantage est un effort maximal beaucoup plus élevé.
- Les actuateurs pneumatiques, comparables aux hydrauliques, sont moins précis que ces derniers et sont dimensionnés pour une plage d'effort plus limitée. Ils sont également moins performants.

- Il existe aussi des systèmes de retour d'effort "par blocage". Le système, lié cinématiquement au corps de l'utilisateur, ne va pas exercer un effort opposé à celui du sujet mais simplement se bloquer. Ainsi, il y a bien peu de chances que le système semble actif, et celui-ci peut s'opposer à des efforts élevés. En contrepartie, ce genre de système ne peut pas exercer un effort réel en cas de besoin, mais seulement s'opposer aux mouvements.

Avantages comparatifs

Les systèmes robotisés sont parmi les seuls à pouvoir délivrer un retour d'effort réel, mais ils ne sont pas exempts de défauts non plus. Un exemple des caractéristiques techniques d'un bras haptique performant est fourni table 4.3 pour se faire une idée des limitations auxquelles on se heurte.

Avantages

- L'effort est bel et bien présent, et les valeurs possibles couvrent des besoins larges. L'application d'efforts n'est possible que sur peu d'autres systèmes (la catégorie suivante, les *SPIDARs* par exemple). Des études ont montré que l'ajout d'un rendu kinesthésique permet de diminuer les temps de réponse de 30% et l'erreur de 60% dans des tâches d'interactions, sans toutefois atteindre des performances similaires à une interaction réelle [Hannaford & Wood, 1989].
- Ces systèmes sont déjà beaucoup utilisés en universités, fiables, et les kits de développements sont complets, accessibles et documentés.

Limitations

- La valeur de l'effort maximal dépend du système considéré, de sa rigidité, de la puissance des moteurs, mais n'est jamais infinie pour autant. Le coût augmente rapidement si de plus hautes performances sont nécessaires.
- Le volume de travail est lui aussi bridé par des contraintes matérielles fixées, à savoir la taille du système et ses possibilités de mobilité. Il existe des systèmes de fixation sur rails en hauteur pour les bras haptiques, notamment par Haption, afin de grandir le volume de travail.
- L'intrusivité de ces systèmes est maximale. Ce n'est pas un problème dans un casque, mais l'intégration dans un CAVE présente son lot de défis.
- Ces dispositifs ont rarement une impédance nulle (c'est-à-dire qu'ils exercent un petit effort y compris lorsqu'ils ne sont pas censés le faire). De plus, ils ne sont pas parfaitement isotropes et cela crée des gênes et des imprécisions lors de mouvements libres.
- Les solides virtuels peuvent être perçus comme actifs par les utilisateurs, selon les algorithmes de rendu haptique mises en place. Ce sentiment rend le toucher moins naturel, et représente l'autre facette du compromis de reproduction d'un contact ni trop faible, ni trop fort.

En définitive, les systèmes de ce type ont bien des défauts, mais sont parmi les seuls à proposer un retour haptique tangible avec de vrais efforts pilotés par la simulation. Leur robustesse permet de réaliser des interactions pertinentes au niveau industriel, mais seulement pour des situations spécifiques et qui ne justifient pas forcément un coût en matériel et en développement si élevé.

Force crête en translation	De 35N à 70N
Force continue en translation	De 9.5N à 30N
Couple crête en rotation	De 3.1 N.m à 5 N.m
Couple continu en rotation	De 1 N.m à 1.4 N.m
Raideur d'asservissement en translation	De 1800 N/m à 8000N/m
Raideur d'asservissement en rotation	30 N.m/rad
Compensation de poids propre	Statique par ressorts
Nombre de boutons	3 (1 clutch, 2 dédiés pour application)
Changeur d'outil	Yes

TABLE 4.3 – Spécifications techniques du Virtuose 6D d'Haption. *Ce dispositif est un bon exemple de bras haptique fonctionnel, performant et populaire pour la recherche appliquée. Source : Haption*

Forces	Faiblesses
Efforts tangibles	Coût élevé
6 degrés de liberté	Non isotrope
Nombreux usages	Espace de travail restreint
Robuste	Intrusif
	Pas toujours ergonomique

TABLE 4.4 – Pros et cons des bras haptiques et des exosquelettes.

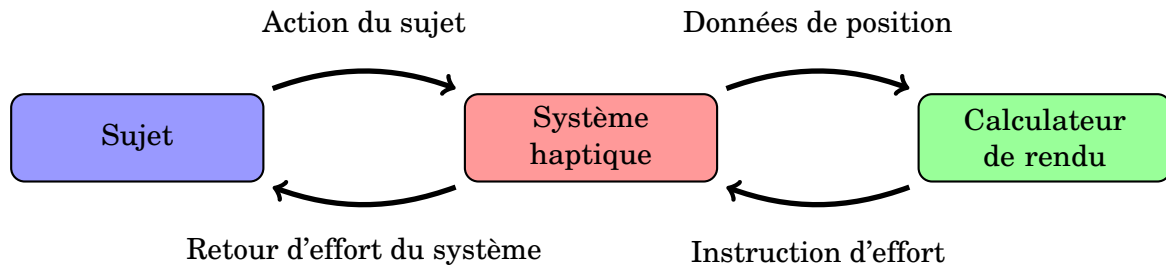


FIGURE 4.8 – Le fonctionnement à double sens des systèmes à fil tendus



FIGURE 4.9 – Différents systèmes à fils tendus. À gauche, un SPIDAR adapté aux doigts et à droite, un Gametrak ©In2Games qui s'attache à chaque main.

4.3.2 Les systèmes à fils tendus (SPIDAR-like)

Les systèmes à fil tendus permettent de transformer un outil, un doigt ou tout autre pointeur en une marionnette pilotée par un à plusieurs fils. La figure 4.9 est un exemple de système à fils tendus adapté aux doigts ou à la main. La tension des fils vient de moteurs (souvent électriques) qui permettent de piloter précisément les efforts dans autant de dimensions que ne l'autorise le nombre de fils. L'acquisition de la longueur des fils permet ensuite d'ajouter une donnée rétroactive de tracking, pour un système bidirectionnel en l'état. Il n'est alors pas nécessaire d'ajouter des données supplémentaires de tracking (voir figure 4.8).

Dispositifs existants

Ces interfaces ne sont pas nouvelles, puisque les premiers modèles de ce type datent de plus de 25 ans, que ce soit pour la version américaine [Lindemann & Tesar, 1989] ou pour la version japonaise qui a développé le concept [Sato, 1991]. Il y a eu par la suite un produit grand public : le *Gametrak* est un contrôleur de jeu sorti en 2004 pour les consoles de salon *Sony Playstation*. Composé de deux fils, un pour chaque main, il offre un retour d'effort unidimensionnel mais aussi un simili de tracking. En plus d'être mesurés en continu par des capteurs incrémentaux, les fils passent dans des joysticks dont la rotation suit la direction des fils. Un algorithme permet alors, en interpolant ces données avec la longueur des fils, de reproduire un espace de travail légèrement cylindrique comme on le voit sur la figure 4.10.

Des systèmes plus performants de la famille du SPIDAR ont fait suite à ce dernier, popularisés par le professeur Makato Sato du Tokyo Institute of Technology, et ont du succès dans le milieu de la recherche. De nombreuses applications ont été analysées, mettant en jeu

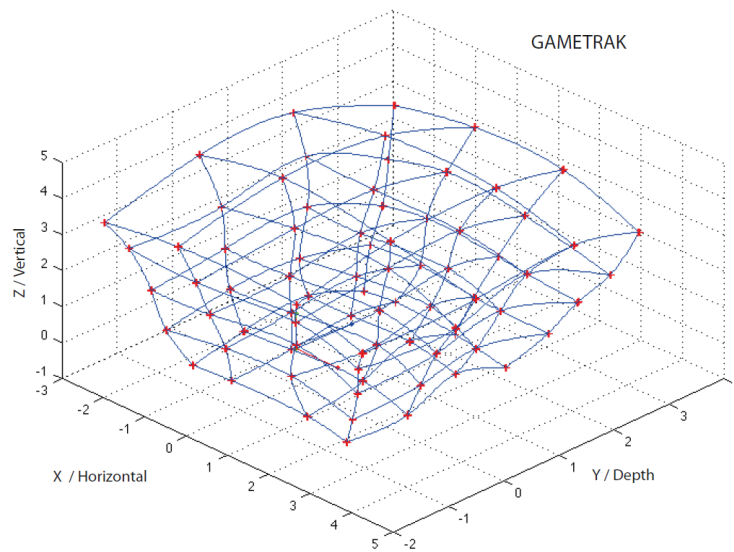


FIGURE 4.10 – Le champ de tracking du GameTrak en espace normalisé [Vigliensoni & Wanderley, 2012].

diverses variantes du concept original : du contrôle haptique des dix doigts sur un bureau, aux interactions à l'échelle 1 dans des CAVEs, en passant même par un accessoire de smartphone permettant le retour d'effort sur un doigt pour des jeux mobiles [Toshima *et al.*, 2015].

Les SPIDARs dimensionnés pour des CAVEs [Buoguila *et al.*, 1997] peuvent gérer une dizaine de fils reliés à des moteurs qui délivrent au minimum 0.05N et jusqu'à 30N. On atteint des résolutions spatiales de 15mm, mais cette résolution dépend de nombreux facteurs comme la raideur des fils, la précision des codeurs incrémentaux des moteurs, la disposition des fils.

Pour finir, des sociétés comme Haption commercialisent des outils basés sur la famille des SPIDARs (Les *Inca 6D* ©), taillés pour le monde professionnel.

Spécificités

Avantages – Les systèmes à fils tendus font partie du club très fermé des dispositifs kinesthésiques peu intrusifs. Ils ont pour eux les avantages suivants.

- Sous réserve d'avoir des moteurs correctement dimensionnés, ces systèmes permettent d'avoir un retour d'effort à 6 degrés de liberté fonctionnel. Les temps d'exécution des sujets sont diminués de 35% pour des tâches simples [Buoguila *et al.*, 1997].
- Utilisable avec ou sans outil, leurs capacités sont souples et permettent des volumes de travail plus grands que les autres systèmes de rendu kinesthésique. On peut facilement se placer dans un CAVE de 3m sur 3m.
- De plus, l'intrusivité introduite est assez faible étant donné la finesse des fils, et l'on peut travailler dans des CAVEs sans crainte d'occulter l'environnement visuel.
- Enfin, ces systèmes incluent une mesure plus ou moins précise de tracking : Au moyen de codeurs incrémentaux sur les moteurs pour la plupart, la combinaison de la

Forces	Faiblesses
<p>Efforts importants</p> <p>6 degrés de liberté en théorie</p> <p>Espace de travail large</p> <p>Tracking induit</p>	<p>Pas de retour cutané</p> <p>Degrés de libertés dépendant de la position</p> <p>Zones inatteignables à cause des fils</p> <p>Ergonomie peu attrayante</p> <p>Nécessité que les fils restent tous tendus</p>

TABLE 4.5 – Pros et cons des systèmes à fils tendus.

longueur de chaque fil donne une information sur la position du point, aussi précise que le permettent les degrés de liberté du système.

Inconvénients – Bien que peu de systèmes kinesthésiques soient si peu intrusifs et aient un volume d'action si large, les SPIDARs ont des défauts majeurs.

- Le rendu cutané, s'il peut être rendu facilement par un système additionnel, n'est pas réalisé par les fils tendus. On préférera donc sans doute les utiliser avec un outil tenu en main pour rendre l'interaction plus naturelle.
- La tension dans les fils doit être permanente pour que ceux-ci restent tendus, et ce même en mouvement libre lorsqu'aucun retour haptique doit être rendu. Du coup, les gestes de l'utilisateur sont légèrement contraints (l'impédance du système est non nulle).
- Les mouvements brusques des sujets peuvent détendre les fils. Lors de telles situations, l'effort disparaît, puis reparaît brutalement. La présence est brusquement diminuée et l'utilisateur est ramené à la réalité des artifices haptiques attachés à son interaction.
- Les fils peuvent se croiser et, malgré leurs 6 DDLs théoriques, on est plutôt loin du compte dans la pratique. Les couples ne sont rendus que dans certaines positions, Et la qualité du rendu général dépend aussi beaucoup de la forme des objets que l'on touche. Pour un vrai rendu à 6 DDL, il faut presque une dizaine de fils sur le dispositif de pointage, que ce soit le doigt ou un outil.
- Les SPIDARs ne sont pas suffisamment ergonomiques. Il faut faire attention à ne pas emmêler les fils tous fins, les attacher un par un à ses doigts ou à l'outil, puis seulement lancer la simulation. S'ils sont intéressants du point de vue scientifique, il semble compliqué de les implanter dans l'industrie tant ces outils sont contraignants et alors que les usagers rechignent déjà à utiliser des lunettes stéréoscopiques et des systèmes de tracking moins encombrants.

4.3.3 Haptique passive

Il existe un autre moyen assez simple d'introduire un retour kinesthésique. Il est possible d'interposer un objet tangible colocalisé avec la zone de collision de l'objet virtuel et de se débrouiller pour que les sujets ne fassent pas la différence entre les deux [Carlin *et al.*, 1997; Hoffman, 1998]. On parle alors d'haptique passive, d'augmentation tactile, ou encore

dans certains cas de pseudo-haptique s'il n'y a pas de nécessité de colocalisation [Lecuyer *et al.*, 2003]. Une interface telle a des contraintes différentes selon le dispositif d'affichage qui lui est couplé.

- Dans un HMD qui occulte l'environnement extérieur, on peut placer tous les objets tangibles que l'on veut de part et d'autre du sujet. On perd tout de même une partie de l'intérêt du virtuel, sa souplesse. On ne peut plus s'immerger dans différents scénarios en quelques clics car il faut replacer avec soin différents objets, dont la localisation doit être calibrée avec précision en fonction de l'environnement.
- L'usage d'un CAVE oblige en plus à utiliser des objets peu visibles. Les contraintes d'intrusivité et les besoins en matière de précision nous obligent à utiliser seulement des objets transparents, fins et plans (comme expliqué dans le paragraphe *Spécificités propres aux environnements non intrusifs*), traités anti-reflets et anti-rayures, avec de fortes contraintes sur les traces d'usure et de saleté. La reproduction des textures est limitée à des surfaces lisses, tandis que le retour d'effort se limite à des objets durs, impénétrables et statiques.

Malgré ces contraintes, l'haptique passive permet d'ajouter un retour haptique simple et peu cher à la simulation, tout en étant parfois bien plus performant que les systèmes complexes décrits précédemment. Ceci se fait au prix d'une mise en place plus lourde et à réitérer pour chaque nouvelle simulation, ainsi que d'une plus faible adaptabilité du système qui ne se prête qu'à quelques cas d'usage précis.

Un exemple de système haptique passif transparent localisé par les technologies infrarouges d'A.R.T est représenté figure 4.11.

En augmentant la confusion entre réel et virtuel à travers les mémoires visuelles et haptiques (et non plus seulement visuelles), on augmente le réalisme de la simulation [Hoffman, 1998]. Malgré sa simplicité apparente, cette méthode a déjà fait ses preuves, par exemple pour aider à guérir de l'arachnophobie [Carlin *et al.*, 1997]. Et pour minimiser encore la complexité de la technique, on peut approximer la forme des objets sans en faire trop souffrir le ressenti comme l'a fait Insko [2001] avec des assiettes.

Fixation

Les objets interposés doivent être placés dans la simulation à des lieux bien précis. Dans un HMD, seule la rigidité peut poser problème. Mais dans un CAVE, les fixations doivent se plier aux mêmes contraintes d'intrusivité que le système haptique en lui-même, ce qui rentre en compétition directe avec la rigidité nécessaire au rendu haptique.

Le point d'attache de l'objet tangible doit être, comme l'objet lui-même, le moins visible possible. Le support doit cependant permettre la résistance aux efforts qui seront exercés par la suite, ainsi que la tenue d'une calibration précise et robuste. Ces efforts restent à définir en fonction des situations, car le moins grand ils sont, le plus invisible le support et l'objet interposé peuvent être.

Calibration – Il est nécessaire, une fois le moyen de fixation de la vitre obtenu, de placer la vitre réelle sur le lieu exact de l'objet virtuel dont elle produit le retour haptique. Nous avons étudié deux philosophies de calibration.

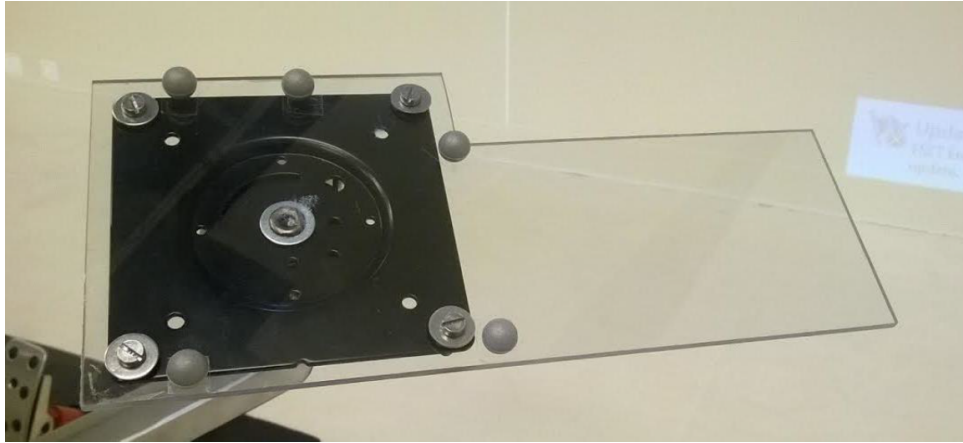


FIGURE 4.11 – Une plaque transparente interposée liée à un bras Ergotron©LX. La transparence de la plaque permet son utilisation dans un CAVE. Le support est intrusif mais possède une bonne rigidité, et ses articulations permettent de replacer la plaque si besoin. La plaque est trackée par un système A.R.T.©pour conserver sa colocalisation en cas de mouvement.

- La calibration analytique. Pour cette méthode, on place la vitre réelle au lieu théorique de la vitre virtuelle. Cela nécessite une calibration particulièrement fine du visuel, en pratique complexe à mettre en œuvre (les défauts du visuel sont détaillés dans le chapitre 5).
- La calibration subjective. Ici, on demande à chaque sujet de colocaliser lui-même le réel et le virtuel de façon qu'ils coïncident pour sa vision. Cette méthode peut sembler plus contraignante car elle requiert de recalibrer le système pour chaque nouvel usager. En pratique, elle permet une précision parfois supérieure (et acceptable) à celle de la méthode précédente, grâce à la prise en compte sous-jacente des spécificités morphologiques du sujet.

Spécificités propres aux environnements non intrusifs

Il n'est pas trivial de reproduire un objet physique à l'identique de l'objet virtuel et de les superposer, d'autant plus dans des environnements qui nécessitent peu d'intrusion. On pense évidemment aux CAVEs, où l'on aimerait intégrer ce type d'objet sans qu'ils jurent avec le reste de la scène.

- D'une part, la transparence doit être irréprochable. Non seulement pour ne pas polluer l'espace visuel et rompre la présence, mais aussi pour des soucis de perception spatiale. En effet, dès lors que l'objet n'est que légèrement visible, celui-ci est perçu comme devant tous les objets virtuels par l'ordre de chevauchement. La perception de la profondeur est particulièrement affectée.
- Dès qu'un objet transparent est trop épais ou, pire, s'il n'est pas plan, les lois de la réfraction engendrent de fortes imprécisions et déformations de l'image comme expliqué figure 4.12).
- Une fois que l'on s'est contraint à n'utiliser que des objets plans, le problème des bords se pose. Les bords d'une plaque vitrée sont souvent des arêtes simples, qui causent de fortes disparités d'opacité et de déviation de la lumière. Si les arêtes

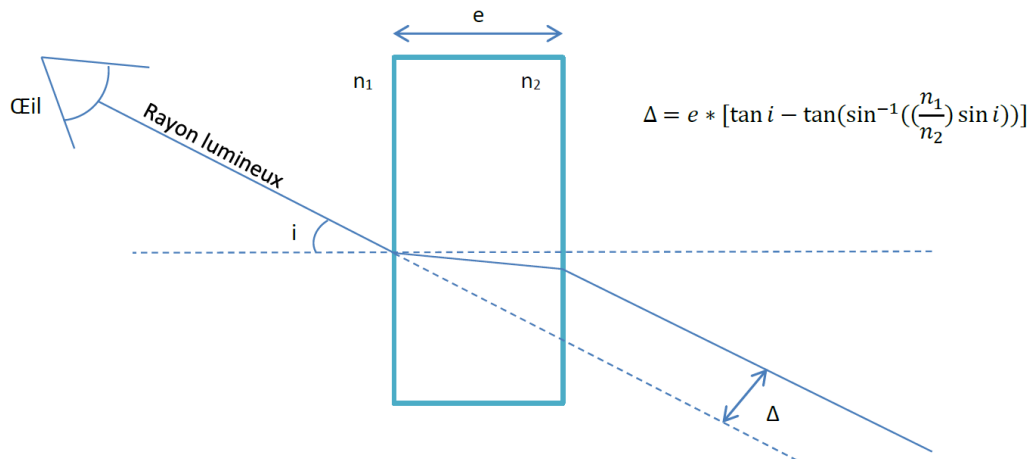


FIGURE 4.12 – La réfraction sur un objet plan. Dans cette situation, si le regard est à 30° et pour une largeur d'objet $e = 5\text{mm}$, la différence de position est de $\Delta = 1.1\text{mm}$.

ne sont pas parfaitement colocalisées sur leurs homologues virtuels, elles risquent d'être parfaitement visibles. Dans la pratique, on préfère éloigner les bords de la vitre des bords de l'objet virtuel, car la colocalisation est presque toujours imparfaite, et ce défaut ressort moins si les bords sont éloignés. Si l'on tient à la colocalisation, chaque petit défaut, et notamment la latence, devient une rupture de superposition impactante qui doit être considérée.

Pilotage dynamique

Pour dynamiser le dispositif mais aussi le rendre plus rapide à configurer, on peut imaginer un système d'articulations permettant de piloter un objet tangible aux endroits où il est nécessaire d'appliquer un retour kinesthésique. Un tel système doit à nouveau être suffisamment rigide, mais il doit également être doté d'un algorithme d'anticipation de mouvements performant. Pour finir, il doit avoir les spécificités habituelles des bras haptiques : fréquence supérieure à 1Khz, silence en fonctionnement, vitesse, précision et finesse élevées.

Une collaboration entre Renault et Clarté a pour objectif le développement d'une *Interface à Contact Intermittents* de ce type, destinée à simuler différentes textures grâce à un système de changement d'outil au bout d'un bras de robot à algorithmie prédictive. Microsoft a aussi quelques études sur le sujet, et notamment le TouchMover [Mike Sinclair, 2013], où un écran bouge en profondeur pour que sa vitre s'interpose en cas de collision virtuelle (figure 4.13).

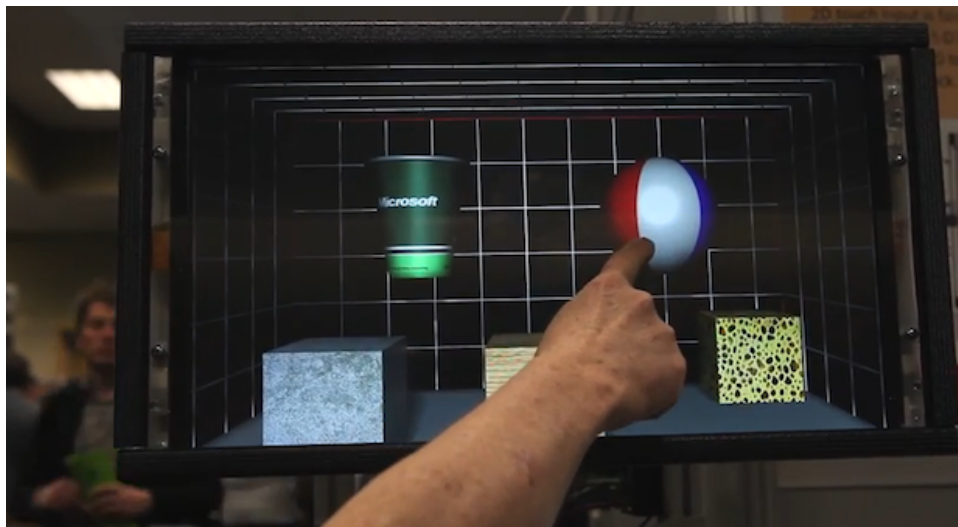


FIGURE 4.13 – L'interface *TouchMover* de Microsoft. *L'écran avance et recule en fonction de la profondeur de l'objet touché.*

Forces	Faiblesses
Kinesthésie réelle	Calibration complexe requise
Cutanée tangible	Texture unique
Ergonomique	Plus ou moins intrusif
	Spécifique à certains usages

TABLE 4.6 – Pros et cons des systèmes d'haptique passive.

4.4 Dispositifs complémentaires

Les configurations matérielles de l’affichage et de l’haptique seules ne suffisent pas à assurer le bon déroulement d’une simulation. D’autres outils, comme la localisation dans l’espace, le son tridimensionnel ou encore le moteur de rendu graphique sont tout aussi importants, bien que moins en rapport direct avec l’haptique.

4.4.1 Localisation dans l’espace

Le tracking est un élément clé des simulateurs de réalité virtuelle et des outils d’interaction. Il permet en premier lieu d’ajouter la parallaxe aux systèmes de vision, en suivant les yeux de l’utilisateur pour reproduire les pyramides de projection (frustums) adéquates. Dans le cas des retour haptiques, la localisation permet au système de détecter le lieu des interactions de l’utilisateur et d’agir en conséquences (actions sur la scène virtuelles, réponses). Cette détection passe généralement par un moteur de collision associé à un avatar de ou des outils d’interaction, visible ou non. Ainsi, le déplacement de l’outil (la main par exemple) fait bouger un avatar virtuel de l’outil en parallèle, avatar dont la collision avec le reste de l’environnement est évaluée à chaque instant.

Technologies de tracking

Certains dispositifs haptiques intègrent une acquisition du tracking plus ou moins précise, sans système additionnel. C’est le cas de la plupart des exosquelettes ou des SPIDARs. Cependant, les systèmes qui n’en sont pas dotés doivent souvent être suppléés d’un tracking externe (seule l’haptique passive peut ne pas en être dotée).

Les dispositifs de tracking sont nombreux et variés, et ce document n’a pas vocation à tous les recenser. Toutefois, il est intéressant de connaître les différentes technologies les plus utilisées et les différences pratiques de ces systèmes afin de choisir la solution la plus pertinente au cas souhaité. Deux dispositifs de tracking optique sont montrés à titre d’exemple dans la figure 4.14.

Parmi les technologies populaires, il existe :

- Le tracking optique sans marqueur, avec des appareils comme Kinect® ou Leap Motion®. Ergonomiques et user-friendly, au prix d’une précision et d’une fiabilité moindres.
- Le tracking optique avec marqueurs actifs ou passifs, le plus utilisé dans les CAVEs avec les systèmes d’A.R.T². Les marqueurs permettent une grande finesse, au delà du millimètre, et la robustesse suffisante.
- Les systèmes de tracking magnétique, plutôt utilisés pour du *full body motion tracking*, notamment dans l’industrie cinématographique. Moins précis mais pour de plus grandes zones, et sans problèmes d’occultation.
- Le tracking par centrales inertielles et accéléromètres, performant pour les rotations et accélération, mais pas fiable pour les déplacements absolus (l’erreur s’accumule à l’intégration).
- De nombreux tracking alternatifs : par fibres optiques, par radiofréquences, par toutes sortes d’ondes, peu répandus.

2. <https://ar-tracking.com/index.php>



FIGURE 4.14 – Deux dispositifs de tracking optique, avec et sans marqueurs. *Du fait des marqueurs, le système de gauche (A.R.T.) est plus fin et précis que celui de droite (Leap Motion), et a un champ de détection plus large.*

Chaque technologie a ses avantages, et elles varient principalement sur la finesse de la localisation, sa robustesse, son ergonomie. Par exemple, si le tracking optique avec marqueurs est fin et précis, il manque de robustesse à cause des occultations possibles. Il manque également d'ergonomie, problème que l'on peut résoudre en ôtant les marqueurs, mais on perdra alors en précision ou en portée.

Intégration dans le rendu haptique

Le tracking est un maillon important de la boucle Action-Perception-Sensation représentée sur la figure 2.9. Du point de vue technique, il est soumis aux mêmes contraintes de latences et de fréquence d'échantillonnage que les autres maillons de la chaîne. Il est donc nécessaire d'avoir une fréquence au moins supérieure à celle du rendu visuel, car les processus s'effectuent en même temps, et une latence minimale : le processus de tracking ne se fait non pas parallèlement au reste du rendu haptique, mais bien seul en début de chaîne, sa latence s'additionne donc à la latence totale.

Specs. Système	Cutané	Kinesth.	Non intrusif	Ergonomie	Cumulable	Compatibilité CAVE	Zone de travail	Outil
Exosquelettes	Non	Oui	Non	Non	Peu	Non	Petit à moyen	Non
Bras haptique	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui*	Petit à moyen	Oui
Fils tendus	Non	Oui	Peu	Non	Oui	Oui	Petit à grand	Non
On-the-air	Un peu	Un peu	Peu	Oui	Non	Oui*	Grand*	Non
Gants haptique	Oui	Non	Un peu	Un peu	Oui	Oui	Infini	Oui
Notifications visuelles	Non	Non	Un peu	Oui	Oui	Oui	Infini	Oui
Notifications sonores	Non	Non	Peu	Oui	Oui	Oui	Infini	Oui

TABLE 4.7 – Comparatif simplifié des différentes technologies d’haptique.

*Sous réserve de certaines conditions à remplir, comme un placement particulier ou un choix technologique contraignant.

CHAPITRE 5

LE VISUEL EN CONFLIT AVEC LES INTERACTIONS

Le visuel des simulateurs est aujourd'hui une source majeure de baisse des performances d'interaction [Sutcliffe *et al.*, 2006], principalement à cause de ses approximations. Ce chapitre a pour but d'identifier les responsabilités du visuel dans les conflits de colocalisation haptique/visuel.

Le visuel sert de repère malgré ses défauts – Le visuel, facile à tromper, joue le rôle de repère spatiale absolu à cause de sa plus grande fidélité perçue [Baitech & Smith, 2000] et souvent faute de la présence d'autres perceptions fiables. Malheureusement, le cerveau collecte des indices de perception spatiale approximatifs et en moins grand nombre que dans un environnement réel, malgré l'affichage en ultra-haute définition de visuels photo-réalistes dynamiques avec un rafraîchissement supérieur à celui des yeux. Les rendus perceptifs du visuel sont alors les plus forts et ceux qui véhiculent la plus grande quantité d'information, faisant oublier leurs inexactitudes au cerveau. Les défauts de la perception visuelle sont réels et ce même dans les simulateurs de la plus haute qualité.

Les interactions demandent de la précision – En réalité virtuelle, l'haptique et l'interaction est rarement considérée comme fiable par le cerveau. La variance attribuée à chaque perception dépend autant des phénomènes inhérents au réel (décrits dans le chapitre 2, mécaniques comme psychologiques) que de la qualité des rendus perceptifs, trop faible. Cependant, un toucher ou une interaction nécessitent beaucoup de finesse et de coordination avec la vue, et tout décalage spatial entre les champs de travail visuels et haptiques rendent les interactions bien difficiles à exécuter. Le sens du toucher prend le rôle du fautif, mais c'est pourtant bien souvent au visuel qu'incombe la faute.

5.1 Le visuel étroitement lié au toucher

Le cerveau s'appuie exclusivement sur la vision pour l'approche qui précède un toucher : *le sujet veut toucher ce qu'il voit, et touche ce qui est là où il voit*. Si l'objet vu et l'objet touché ne sont pas au même endroit, il y a conflit.

Phase d'approche et contact – Une interaction commence par une phase d'approche, pendant laquelle le phénomène continu de la perception visuelle des distances évolue jusqu'au phénomène discret de la perception haptique du contact. Le lieu de contact fait le lien entre une étape du phénomène continu (l'égalisation des profondeurs par exemple) et l'évènement discret. À partir de l'instant de contact, les touches visuels et haptiques sont tous deux perçus et doivent être cohérent. Or, les technologies actuelles nous cantonnent à des visuels qui manquent parfois de finesse, sans que l'on ne s'en rende compte, en plus de manquer d'indices d'approche, comme de la lumière et des ombres. La stéréoscopie, par ailleurs, ne permet pas toujours la perception spatiale la plus précise. Sans indice d'approche, les touches des sujets ne sont pas anticipés, sont moins précis, et nécessitent un retour haptique plus performant en compensation (notamment en termes d'intensité de l'effort et de fidélité temporelle). Sans finesse, le visuel et l'haptique sont rarement au même endroit.

 **Citation**

« A crucial issue in the realism of manipulation of objects in Virtual Reality applications is the achievement of colocated representations. » Antonya *et al.* [2007]

5.2 Sources de défauts visuels

Ce chapitre recense les principales causes visuelles de distorsion de la perception spatiale. Certaines de ces causes ne se manifestent que dans les CAVEs, d'autres plutôt dans les HMDs. Bien souvent, elles sont responsables d'imprécisions sur les positions des yeux de l'utilisateur, à partir desquelles le système est sensé générer des pyramides de vision (frustrums). Les défauts visuels sont alors dûs à des pyramides de vision incorrectes.

Le tableau 5.1 est un résumé des principales sources d'imprécisions visuelles.

Paramètres de mesure de distances	Degré supposé d'influence	Spécificités et solutions	Sources
Accommodation	Faible	Propre au système	[Kenyon <i>et al.</i> , 2008]
Qualité graphique	Non prouvée	Améliorations graphiques : définition, lumière, détails	[Interrante <i>et al.</i> , 2006; Thompson <i>et al.</i> , 2004]
Écart inter-pupillaire	Quelques centimètres de variations de profondeur	Utilisation d'un tracking des deux yeux en temps réel.	[Hibbard & Bradshaw, 2003]
Indices d'échelle	Prépondérante	Insertion d'objets repères de taille connue	[Kenyon <i>et al.</i> , 2007]
Champs de vision limité	Controversée	-	[Knapp & Loomis, 2004]
Parallaxe de mouvement	Dépendante de la distance	Souvent implémentée	[Beall <i>et al.</i> , 1995; Kemeny, 2009]

TABLE 5.1 – Différentes sources de défaut de perception des distances.

5.2.1 Défauts matériels

Les premières imprécisions visuelles viennent de la qualité du simulateur de réalité virtuelle utilisé. Les lentilles des projecteurs, le positionnement des projecteurs, les matrices de déformation des images, l'ajustement des murs ou encore la calibration de la localisation spatiale sont des paramètres spatiaux critiques qui peuvent être la source de quelques millimètres d'erreur sans que le visuel n'en souffre de façon flagrante. La calibration des dispositifs de tracking est particulièrement importante, puisque c'est elle qui régit tous les mouvements de point de vue des utilisateurs.

D'autres paramètres non spatiaux (colorimétrie, contraste) n'impliquent pas directement de défauts spatiaux mais sont quand même sources de baisse de la présence et de l'immersion.

5.2.2 Écart inter-pupillaire (IPD)

L'écart inter-pupillaire est le facteur morphologique le plus souvent évoqué pour justifier des défauts de perception visuelle. En effet, avec de grandes disparités entre les personnes [Dodgson, 2004] et des déviations démontrées, l'IPD est factuellement un des grands responsables de manquements à la perception spatiale. Les simulateurs considèrent souvent que les sujets ont un IPD proche de la moyenne faute d'en avoir une mesure précise, et les écarts qui en résultent sont importants, notamment sur la perception de la profondeur qui est si importante en haptique (figure 5.1).

Si mesurer l'IPD est une solution, elle n'est pas parfaite pour plusieurs raisons. D'une part, celui-ci varie en fonction de la vergence oculaire. Ainsi, l'écart est réduit lorsque l'on regarde des objets proches, comme illustré figure 5.2. Cet effet est moins prépondérant que des écarts sur l'IPD statique, mais a néanmoins son influence. D'autre part, l'influence de l'IPD n'est pas prépondérante par rapport aux autres sources de défauts visuels, la

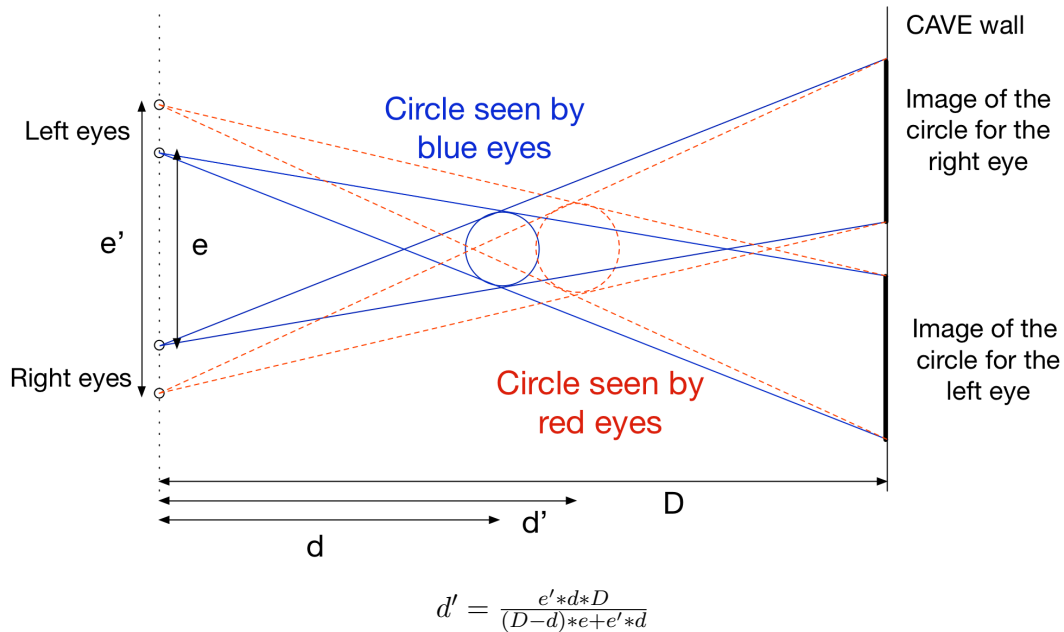


FIGURE 5.1 – L'influence d'un défaut d'écart inter-pupillaire sur la profondeur visuelle. La moyenne de l'écart inter-pupillaire (IPD) est de 64mm chez l'homme, mais les variations sont assez importantes : de 45mm à 70mm pour couvrir toute la population [Dodgson, 2004]. Dans un CAVE moyen, $D = 1,50\text{m}$ et $d = 50\text{cm}$. L'erreur de profondeur est de 5cm pour une différence d'IPD de 1cm.

résolution de ce problème seul n'est qu'un premier pas.

L'influence de l'IPD est présente indifféremment dans les CAVEs et les HMDs, et ces derniers ont souvent un écart de lentilles réglable pour diminuer le problème.

5.2.3 Profondeur des yeux

Les différences de profondeur des yeux ont une influence tout aussi importante que celle l'IPD, mais sont plus compliquées à mesurer. Si les appareils ophtalmologiques parfois utilisés pour acquérir l'IPD mesurent souvent aussi la profondeur des yeux, cette mesure souffre d'être relative au visage de la personne. Or, les lunettes 3D, responsable du tracking dans la simulation, ou encore le maintien ergonomique du casque, s'appuient sur le visage, le nez, les lunettes de la personne, et vont même bouger au cours de la simulation. La profondeur des yeux est donc rarement correcte (et rarement mesurée), avec les conséquences illustrées figure 5.3 : En vision droite, une légère différence d'échelle et de profondeur, une déviation latérale plus grave en vision latérale.

5.2.4 Hauteur des yeux

La hauteur des yeux est encore un facteur d'imprécision spatiale facile à quantifier. Comme on le voit sur la figure 5.4, les images sont décalées verticalement dans le sens de la différence entre les yeux réels et les yeux virtuels. Ce paramètre est rarement pris en compte, car difficile à mesurer. Il s'agit en fait de la distance entre les pupilles et le point de contact nez/lunettes, qui peut en plus varier au cours d'une session (les lunettes peuvent descendre en glissant vers l'avant, puis être remontées, etc.).

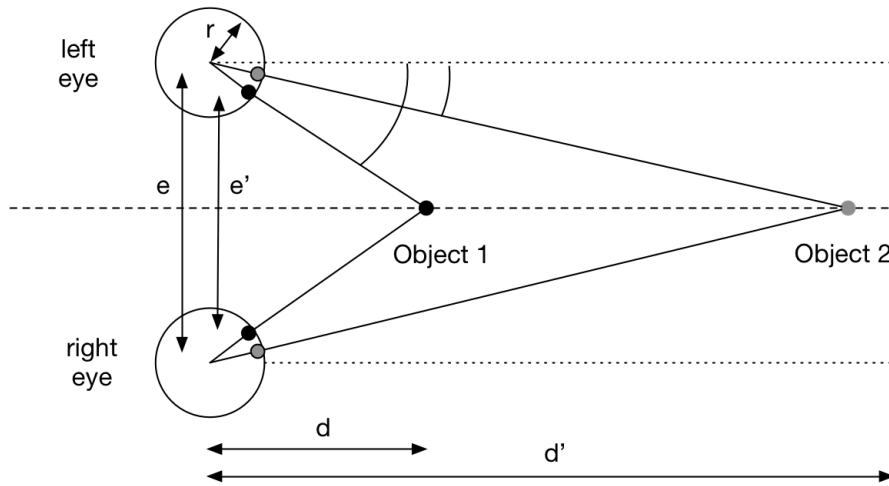


FIGURE 5.2 – L'influence de la vergence sur l'écart inter-pupillaire dynamique. *En fonction de la proximité des objets regardés, l'IPD diminue.*

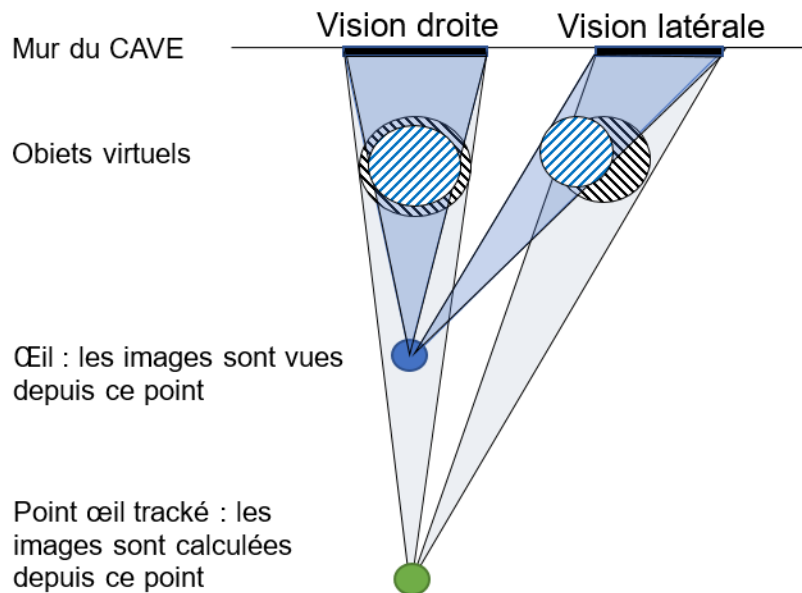


FIGURE 5.3 – L'influence de la profondeur des yeux.

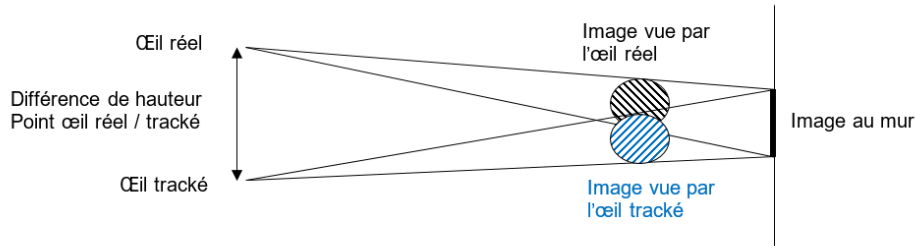


FIGURE 5.4 – L'influence de la hauteur des yeux.

5.2.5 Conflit d'accommodation et de vergence

Dans les environnements de type CAVE ou HMD, l'affichage stéréoscopique se fait sur un écran plan. L'accommodation est donc effectuée à une distance focale constante, tandis que la vergence se fait à la profondeur virtuelle des objets de la scène et pas seulement dans le plan de l'écran. Cette disparité entre distances de collimation et d'accommodation pose plusieurs problèmes :

- L'accommodation est un indice de profondeur dans le réel, et le cerveau ne comprend pas forcément qu'il ne faut pas en tenir compte dans le virtuel. Heureusement, cet effet n'est pas le plus prépondérant [Kenyon *et al.*, 2008], mais tend à faire minimiser les distances.
- Lorsqu'un utilisateur tente de toucher un objet virtuel, l'approche visuelle est un peu confuse. L'utilisateur a le choix entre regarder l'objet à toucher ou son propre doigt, mais ceux-ci ne sont pas dans le même plan d'accommodation. La différence de netteté entre les deux objets, selon que le sujet accommode sur l'un ou sur l'autre, ajoute un malaise supplémentaire dans l'intégration numérique/physique.

5.2.6 Manque d'indices visuels

Le manque global d'indices visuels est une source importante de fluctuations de la perception spatiale. Il a été prouvé par le passé que l'environnement virtuel doit être le plus riche possible, doté d'objets reconnaissables et de tailles connues [Kenyon *et al.*, 2007], qui servent de repères dimensionnels aux utilisateurs. Sans ces repères, le cerveau reçoit moins d'informations spatiales sur son environnement, en plus des informations contradictoires décrites précédemment. Le cerveau ne peut donc pas fusionner ces informations en une perception spatiale robuste [Ernst & Bühlhoff, 2004], il en résulte des fluctuations des perceptions des utilisateurs au cours même de la simulation.

5.3 Gestion de ces défauts dans la simulation

5.3.1 Influence des défauts

Comme on a pu le voir dans cette partie, l'espace visuel vu dans les environnements virtuels n'est pas parfait. Les sources de défauts citées plus hauts, plus ou moins influentes, peuvent fausser :

- La perception des distances.
- La fidélité des échelles.

- La déformation des objets.
- La localisation des objets.

D'une manière générale, les distances sont souvent sous-estimées [Hibbard & Bradshaw, 2003], et ce différemment d'un simulateur à un autre [Combe *et al.*, 2008]. L'importance de ce phénomène est à relativiser, car la perception du réel est également biaisée : on surestime les distances inférieures à 2m et on sous-estime les distances supérieures à 3m [Loomis *et al.*, 1996]. Mais le réel n'a pas de remise en cause possible de sa légitimité (comme expliqué partie 2.1.3), contrairement au virtuel qui laisse planer le doute. De plus, certains conflits (comme l'accommodation/vergence) rendent impossible que la perception soit parfaite, le cerveau ne pouvant pas totalement ignorer ses entrées perceptives.

Ces défauts visuels vont, comme on l'a dit, rendre la synchronisation avec l'haptique bien imprécise et ce particulièrement dans les CAVEs. Tant que tout est virtuel, les problèmes sont moindres et seules quelques déformations peuvent être détectables par un utilisateur aguerri. Les vrais défis apparaissent lorsque les sujets voient du virtuel mélangé au réel (la scène virtuelle et le corps réel, et donc particulièrement dans les CAVEs). La colocalisation physique/numérique ne se fait pas à cause du décalage du virtuel. Lorsque l'avatar de la main, invisible, touche un objet, il est bien possible que le sujet voit sa main réelle encore loin de cet objet ou alors déjà à travers celui-ci. Cela peut produire de la frustration, ou pire, l'impossibilité d'interagir.

5.3.2 Solutions adaptées

Eye tracking – La position parfois peu précise de l'œil virtuel étant si importante, l'idéal serait de localiser directement les yeux dans l'espace [Wann *et al.*, 1995] au lieu de passer par la *head-tracking* rendu par les lunettes. Cependant, les dispositifs de tracking des yeux n'ont pas encore les mêmes souplesses, robustesses, accessibilités et prix que les systèmes de tracking de la tête. Ces technologies sont à suivre, particulièrement dans les casques qui commencent à en être équipés par les constructeurs.

Minimiser les erreurs – Même si la solution parfaite n'existe pas encore, on peut au moins en faire le plus possible pour se rapprocher de la fidélité spatiale, minimiser les défauts de perception des distances et des échelles avec les moyens à disposition pour que l'haptique soit moins limitée en performance par le visuel. Certains utilisateurs mesurent seulement quelques paramètres, l'IPD en particulier. Une mesure de l'IPD seul améliore peu la situation, étant donné les nombreux autres facteurs d'erreur qui s'additionnent. De plus, il est capital d'introduire dans la scène le plus d'indices visuels possible, comme décrit au début de la partie 3.1.

Le contexte et le déroulement de la simulation est aussi important : par exemple, les sujets qui interagissent avec leur environnement en perçoivent mieux les dimensions [Richardson & Waller, 2007]. Forcer les sujets à se concentrer sur les divers indices disséminés dans leur environnement leur permet de mieux les assimiler et d'avoir moins de charge cognitive disponible pour se concentrer sur les autres défauts de la simulation.

Il est également possible de faire le choix, comme dans la partie 8, d'inverser le raisonnement. Au lieu de replacer le visuel, on tente par diverses méthodes de déplacer le moteur d'interaction là où l'utilisateur le voit.

CHAPITRE 6

CONCEPTION D'INTERFACES HOMMES-MACHINES EN RÉALITÉ VIRTUELLE

6.1 Introduction et contexte

À l'heure où l'haptique est de plus en plus souhaitée dans des simulateurs de réalité virtuelle très performants sur le visuel, les implémentations de systèmes adéquats ne sont pourtant pas encore au rendez-vous. La faute à des systèmes qui manquent de maturité, que l'on parle de la famille des SPIDARs à l'ergonomie peu engageante, des gants vibrotactiles avec leur absence totale de retour kinesthésique, ou encore des bras mécaniques et exosquelettes motorisés avec leur intrusivité maximale. Chaque dispositif est un compromis sur certaines modalités d'interaction. Les besoins, bien que variés, sont pourtant précis et chaque cas d'usage ne nécessite pas d'exploiter l'ensemble des possibilités de l'haptique. Il faut avant tout ajouter des possibilités d'interaction performantes aux environnements virtuels.

En automobile, les Interfaces Hommes-Machines (IHMs) de la planche de bord sont des systèmes où l'innovation sur l'ergonomie, le design ou l'utilisabilité est permanente. En résultent de nombreuses interfaces variées à concevoir, prototyper, évaluer, valider. Les technologies du virtuel permettent de procéder à toutes ces étapes de façon plus efficace et agile, en évitant au maximum les prototypes physiques et en offrant la possibilité d'essais en contexte, à l'intérieur du véhicule, voire même en conduisant.

6.1.1 État de l'art spécifique

Se limiter à un cas d'usage précis permet de choisir un système haptique adapté, qui ne nécessite pas de répondre à d'autres besoins. Pour cette étude, deux dispositifs d'haptique passive sont évalués comparativement à un système de substitution sensorielle. Les problématiques de perception spatiale sont particulièrement influentes, car l'utilisation d'un CAVE apporte son lot de contraintes, comme l'intrusivité visuelle [Scheibe *et al.*, 2007], l'intrusivité physique, la synchronisation visuo-haptique ou l'utilisabilité industrielle.

Haptique passive

Les systèmes d'haptique passive ont récemment reçu une attention particulière de la communauté scientifique. Ils consistent à placer un objet tangible au même endroit qu'un objet virtuel qui nécessite de procurer un retour haptique. Les sujets confondent ainsi réel et virtuel, et peuvent toucher l'objet.

Hoffman [1998] a obtenu un retour sensoriel haptique satisfaisant en introduisant des assiettes réelles dans un environnement virtuel. Carlin *et al.* [1997] ont évalué la possibilité de guérir la phobie des araignées grâce à une implémentation similaire d'araignées en plastique, et ont également obtenu des résultats prometteurs. Insko [2001] a significativement amélioré la présence virtuelle dans un décor visuel de falaise par l'ajout d'haptique passive. Chacun a conclu que l'haptique passive génère un retour sensoriel approprié dans de nombreuses situations, et a fourni des preuves de l'intérêt à ajouter des capacités haptiques aux environnements virtuels. L'haptique passive, sans danger, abordable, facile à implémenter et ne nécessitant aucune puissance de calcul supplémentaire, est particulièrement intéressante, mais présente tout de même quelques défauts :

- Chaque objet passif doit être précisément ajusté, recalibré ou même construit à chaque changement de scène virtuelle, réduisant de fait la souplesse plébiscitée des technologies virtuelles.
- Les objets physiques ne peuvent pas être masqués par des objets virtuels, ce qui peut causer des aberrations de superposition.
- La cohérence entre les positions des objets réels et virtuels peut s'avérer complexe à atteindre, principalement en raison de l'erreur sur la localisation des yeux [Chen *et al.*, 2014; Dodgson, 2004; Kenyon *et al.*, 2007; Wann *et al.*, 1995].

Substitution sensorielle

Les barrières techniques responsables des difficultés à équiper en systèmes haptiques les simulateurs de réalité virtuelle sont hautes, et particulièrement face aux retours kinesthésiques. Pour ces raisons, des solutions plus légères ont été envisagées afin d'ajouter des possibilités d'interactions malgré tout, notamment à travers la substitution sensorielle : remplacer le sens du toucher par celui de la vision ou de l'ouïe.

Des indices visuels réalistes, comme des ombres portées ou des interréllections, ont permis d'augmenter significativement les performances des interactions dans plusieurs études [Chan *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2000; Madison *et al.*, 2001]. Kitagawa *et al.* [2004] ont mesuré les performances de sujets appliquant des efforts en présence d'indices non réalistes visuels et auditifs, et ont conclu que les indices visuels continus ont une forte valeur ajoutée tandis que les indices auditifs peuvent s'avérer trop intrusifs si utilisés à outrance. De la même manière, Sreng *et al.* [2009] ont comparé l'ajout de glyphes et de flèches à l'ajout de lumières, et ont conclu que le visuel choisi était dépendant de l'information recherchée (position, effort, contact). Dans des recherches similaires, Petzold *et al.* [2004] a conclu qu'en dépit des intérêts certains de la substitution sensorielle, les sujets sont confrontés à une surcharge cognitive dues à la traduction de données visuelles en efforts.

Perception spatiale

La perception de la profondeur et des échelles n'est pas toujours exacte dans les environnements virtuels et elle dégrade l'expérience haptique. Dès lors qu'un sujet voit un objet en un

endroit différent de celui qu'il touche, ou inversement, la perception perd de sa robustesse et de sa fiabilité [Ernst & Bühlhoff, 2004]. Or, les environnements virtuels sont coutumiers des débats sur la perception des échelles, souvent considérées comme sous estimées, parfois l'inverse. Les échelles sont en fait étroitement liées à la profondeur, qui est souvent biaisée par un conflit d'accommodation, de mauvaises données anthropométriques, ou encore une superposition aberrante. Différentes études ont conclu que, pour maximiser une perception robuste des échelles et de la profondeur, la scène virtuelle doit être emplie d'objets de tailles connues et respecter les cohérences d'une scène réaliste [Cutting & Vishton, 1995; Kenyon *et al.*, 2007; Loomis *et al.*, 1996]. Cette préconisation n'est cependant pas toujours respectée, pour des raisons d'économies de puissance de calcul ou de développement. La qualité visuelle des simulateurs pourrait aussi influencer sur la robustesse de la perception spatiale, et des études révèlent de fortes disparités entre les perceptions des sujets [Interrante *et al.*, 2006].

6.2 Objectifs et questions de recherche

Cette expérimentation a pour but d'étudier l'utilisabilité et la viabilité d'un système haptique passif dans le cadre de tests d'ingénierie d'IHM. Plusieurs dispositifs sont testés, simulant différentes modalités haptiques. Nous cherchons aussi à évaluer l'influence de la kinesthésie sur la précision, la durée d'interaction et la perception spatiale. Le système doit pouvoir améliorer les performances du simulateur et se rapprocher au mieux des conditions réelles pour reproduire avec efficacité l'agrément d'utilisation, la confiance dans des choix d'ingénieurs, la pertinence de l'utilisation du simulateur pour tel métier, etc. Les barrières scientifiques sont multiples, relevant des problématiques liés au CAVE comme de celles liées aux modalités haptiques ou à l'industrie.

6.2.1 Question de recherche

Nos questions de recherche portent sur la valeur ajoutée d'interfaces haptiques tangibles dans un contexte de système immersif total (de type CAVE) :

- À quel point une interface tangible apporte une meilleure sensation d'interaction en immersion virtuelle ?
- Quelle sont les performances des interactions lors de l'utilisation d'une interface virtuelle tangible ?

Nous attendons une valeur ajoutée en précision et en confiance dans l'interaction grâce à un processus de calibration dans l'espace plus complet. Par conséquent, nos hypothèses sont les suivantes :

- La précision des interactions est meilleure lors d'un retour tangible.
- L'interface tangible offre un meilleur confort à l'utilisateur lors de ses interactions.

6.3 Implémentation

6.3.1 Apparat

Ces études se sont déroulées au centre de réalité virtuelle et de simulation immersive (DEA-TDV) chez Renault. Le CAVE 4 faces P3I (Plateforme d'Intégration Immersive Industrielle, Figure 6.1), équipé de vidéoprojecteurs à ultracourte focale full HD, a été utilisé pour

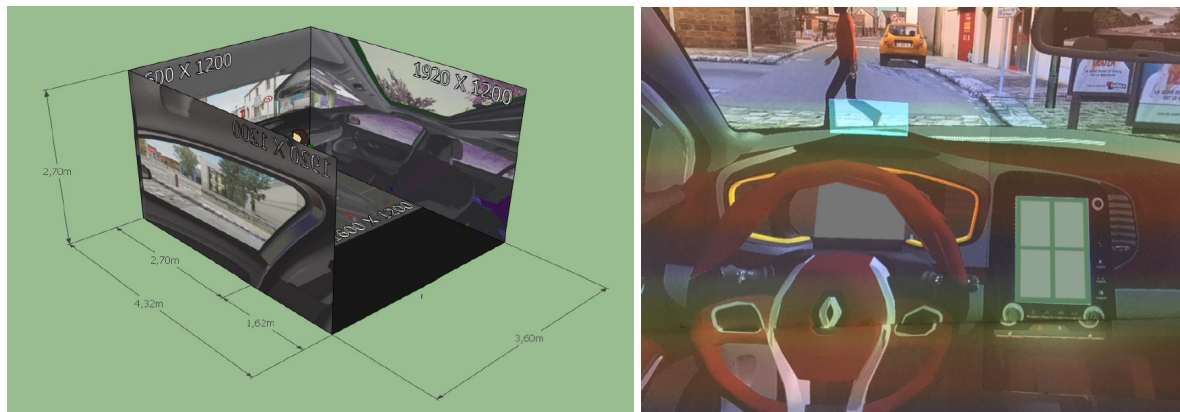


FIGURE 6.1 – Le CAVE P3I, et la scène virtuelle qui y est affichée. Ses dimensions associées à sa résolution permettent un pixel carré de 2.25mm de côté.

évaluer les différents outils de conception d'IHM en contexte dynamique ou statique. La 3D est obtenue par stéréoscopie active via des lunettes *Volfony*, le tracking de la tête est effectué par les technologies infrarouges d'A.R.T.

L'acquisition des interactions des sujets se fait au moyen d'un gant A.R.T. Fingertracking à trois doigts, et le retour sensoriel se fait suivant plusieurs solutions :

- Un retour logiciel intangible, avec des changements de couleurs dans l'interface.
- Un retour physique tangible, au moyen d'une vitre transparente attachée à une potence.
- Un retour physique tangible, au moyen d'une tablette tactile réelle incorporée dans l'environnement.

Les scènes virtuelles sont calculées et affichées par Oktal SCANer Studio©¹ [Kemeny, 1993], et placent les sujets en situation de conduite dans un environnement urbain. Le véhicule est directement injecté depuis une maquette numérique standard de CATIA grâce au middleware TechViz.

Latence – La latence théorique du système visuel est environ de 30ms, et les sujets n'ont pas signalé de ralentissements ou de retard sur l'image. La diffusion de l'IHM se fait à 30Hz, tandis que le moteur d'interaction a une latence stable environnant les 50ms en raison des flux réseaux additionnels.

Interface tactile – L'interface tactile a été développée en interne et affiche simplement 4 boutons, qui sollicitent tour à tour aléatoirement une interaction en changeant de couleur. Après une interaction, l'interface patiente entre 3 et 5 secondes avant de solliciter la suivante.

L'interface s'exécute sur une unité de calcul externe et est diffusée dans la scène virtuelle à 30Hz.

1. <http://www.oktal.fr/fr/>

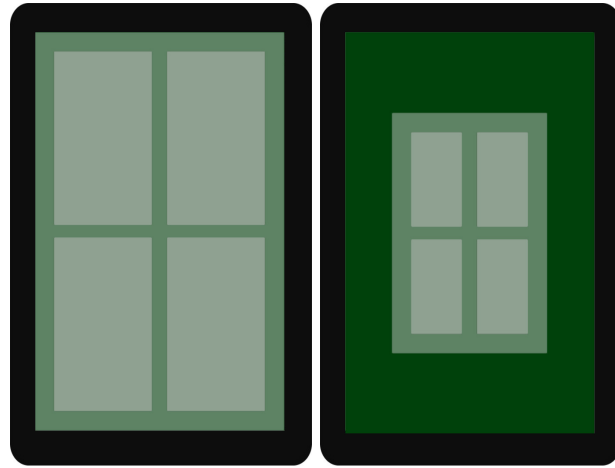


FIGURE 6.2 – Le logiciel utilisé lors de l'expérimentation. Deux échelles sont utilisées pour évaluer la performance des sujets.



FIGURE 6.3 – La vitre passive utilisée en phase Y et le gant A.R.T. Fingertracking.

Modalités haptiques utilisées – Les 3 modalités haptiques, correspondant aux 3 phases X, Y et Z effectuées par les sujets, sont détaillées ci-après.

- La modalité intangible n'utilise aucun système haptique additionnel. Lorsque les sujets touchent un bouton, celui change de couleur pour manifester la réussite de l'interaction.
- La vitre transparente est représentée figure 6.3. Elle est plus large que l'écran tactile qu'elle simule, pour éviter les effets de bords (comme la réfraction).
- La tablette classique est une Samsung Galaxy A6 attachée à un bras Ergotron LX. Elle contient la même IHM que celle qui est diffusée dans le CAVE, aux exactes mêmes dimensions.

6.3.2 Panel de sujets

Les sujets choisis pour cette étude, au nombre de 20, sont tous des employés du Groupe Renault pour des raisons de confidentialité. Souvent formés à l'ingénierie, ils se répartissent

en une population novice des problématiques de réalité virtuelle et une population sensibilisée voire experte de ces technologies. Une majorité de sujets a entre 25 et 35 ans, tandis que certains ont plus de 60 ans. Leurs spécificités sont relevées par des questionnaires, des questions orales, et par leurs remarques.

L'objectif statistique de l'étude est non seulement de décrire une situation, à savoir les différences de performances entre les systèmes, mais également d'en identifier les causes et, si possible, de généraliser ces faits à une population plus large.

6.4 Déroulement de l'expérimentation

6.4.1 Instructions aux sujets

Les sujets ont pour instruction d'interagir avec l'écran tactile de la console centrale lorsque celui-ci sollicite une interaction. Afin que chaque sujet ne se comporte pas anormalement pour des raisons non pertinentes, ceux-ci sont informés des mesures prises sur leurs interactions.

- Sachant leurs temps d'interaction chronométrés, ils sont tenus de conserver une vitesse de mouvement naturelle et de remettre les mains sur le volant après chaque interaction.
- Sachant leur erreur relative connue, ils sont tenus de viser le centre des boutons.

Les sujets sont invités à être loquaces et à exprimer leur pensées, critiques et remarques. Les questionnaires qu'ils remplissent restent à leur disposition jusqu'à la fin de leur expérimentation, afin qu'ils puissent comparer et corriger leurs résultats après avoir essayé tous les systèmes.

6.4.2 Calibration subjective

Lors de chaque changement de modalité haptique, il est demandé aux sujets de procéder à une calibration subjective du moteur d'interaction et du système haptique s'il y a lieu. Cette calibration permet d'obtenir la cohérence entre le visuel et l'haptique en ignorant les disparités morphologiques des sujets, qui les ont souvent conduit à voir les objets à des endroits différents de l'endroit où ils les touchaient pendant les tests préliminaires.

Pour effectuer cette calibration, les sujets touchent successivement 3 coins de l'écran virtuel qu'ils voient. Le moteur d'interaction est ensuite automatiquement adapté à ces positions perçues (voir figure 6.4), et peut prendre en compte les interactions correctement. Pour éviter un comportement erratique en présence de la vitre transparente, un décalage de 0.5mm de profondeur est ajouté à cette calibration.

Lorsque la vitre transparente est utilisée, il est également demandé aux sujets de la placer subjectivement. Ils sont tenus de faire cette calibration avec attention, en touchant la vitre et en la déplaçant jusqu'à obtenir la position correcte, car une mauvaise localisation de la vitre a altéré les résultats lors des tests préliminaires.

Pourquoi pas une calibration analytique ? Il a été initialement envisagé d'utiliser une calibration analytique pour synchroniser visuel et haptique. La variation de la position du visuel étant liée à un biais de la pyramide de vision, l'objectif est alors d'avoir précisément connaissance de la position des deux yeux du sujet et non seulement d'un point œil

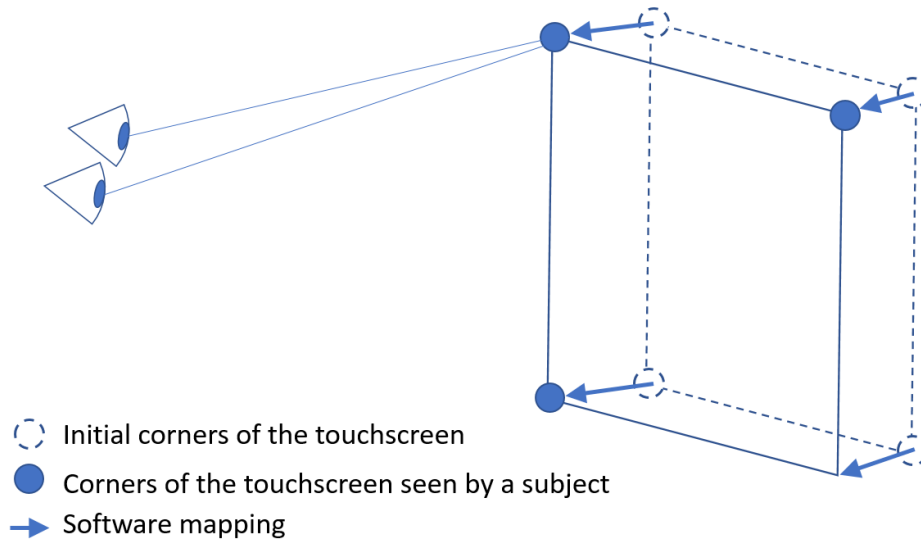


FIGURE 6.4 – La calibration effectuée pour le moteur d'interactions.

grossièrement interpolé depuis la position des lunettes 3D. En effet, comme expliqué dans la partie 5 :

- Des variations sur l'écart inter-pupillaire biaisent la profondeur, les échelles et la perception latérale.
- Des variations sur la hauteur du nez (sur lequel sont posées les lunettes) entraînent des décalages verticaux de l'image et de la parallaxe.
- Des variations sur la profondeur des yeux entraînent des décalages horizontaux et verticaux de l'image en vision latérale, en plus de défauts de perception et d'échelle.

L'acquisition de ces informations s'avère complexe, particulièrement pour la hauteur du nez et la profondeur des yeux qui sont relatives à la position des lunettes. Lunettes qui, de toute façon, peuvent être remises en place différemment entre les essais. Quelques essais préliminaires nous ont convaincu que, pour les besoins de cette expérimentation, une calibration subjective s'avère plus performante.

6.4.3 Séries

Chaque sujet effectue 6 séries de 20 interactions, qui permettent de tester les deux échelles d'interface pour chaque modalité haptique.

- **Phase X** : 2 séries avec un système virtuel d'interaction intangible, basé uniquement sur les changements de couleurs de l'interface.
- **Phase Y** : 2 séries avec un système virtuel haptique tangible, la vitre transparente passive.
- **Phase Z** : 2 séries avec une tablette tactile physique.

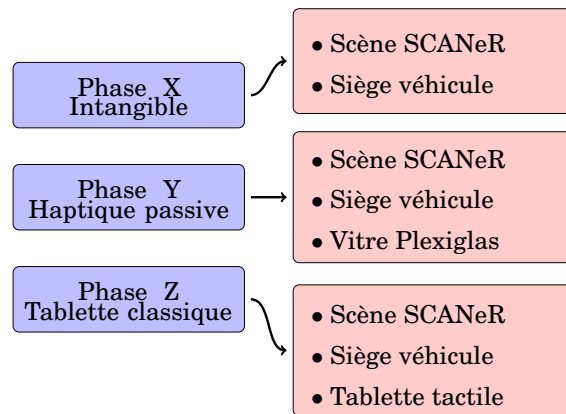
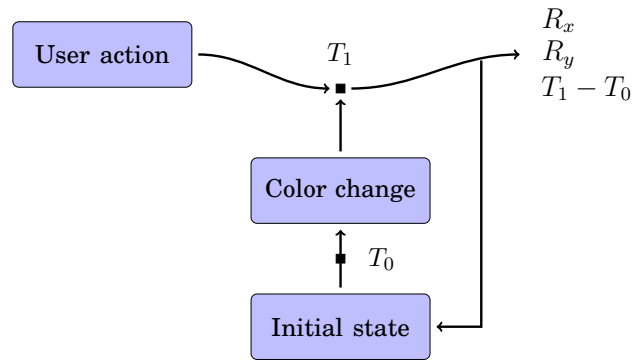


FIGURE 6.5 – Déroulement des séries. Pour chaque interaction, les erreurs relatives R_x, R_y et le temps d'exécution $T_1 - T_0$ sont sauvegardés.

Les interactions sont sollicitées par le passage à la couleur verte de l'un des 4 boutons de l'interface, comme schématisé figure 6.5.

À la fin de chaque série, les sujets répondent à deux questionnaires, un spécifique au système haptique et un questionnaire de présence (traduit de Witmer & Singer [1998]).

6.5 Résultats

À partir des données brutes obtenues, nous avons pu identifier la distribution des performances pour chaque modalité. Les résultats présentés ont été soumis à des analyses de variance pour une erreur sous les 5%. Les résultats des sujets qui ne sont pas arrivés à terme de l'expérimentation n'ont pas été pris en compte. Pour finir, les analyses numériques portent sur 17 sujets. La plupart des analyses statistiques ont été faites avec des test *t de Student pour donnée appariées*, lorsque la normalité des données étaient vérifiée (par un test de *Shapiro-Wilk*). En cas de non-normalité, nous nous sommes tournés vers des *tests des rangs signés de Wilcoxon*.

6.5.1 Temps d'exécution

Les données sur le temps d'exécution des sujets peuvent être observé figure 6.6. La différence est significative ($p < 0.05$) entre les différentes modalités haptiques. La plus haute performance est atteinte avec la tablette classique (phase Z), avec laquelle les sujets ont procédé à leurs interactions en 1.5 secondes en moyenne. En comparaison, la phase intangible (phase X) et celle d'haptique passive (phase Y) sont plus lentes et la phase X est significativement plus lente que la phase Y (deux fois plus lente que la phase Z).

Nous avons identifié deux causes de ces différences de temps d'interaction :

- **La robustesse de la perception** a été une difficulté pour quelques sujets. Certains ne sont pas parvenus à terminer la phase intangible avec l'échelle la plus petite, et la plupart ont parfois dû s'y reprendre à plusieurs fois pour réussir une action précise. Ce phénomène se manifestait également en présence de la vitre transparente, mais bien moins fréquemment. Sans retour tangible, les sujets s'enfoncent de plus en plus loin à travers les boutons, recalibrent inconsciemment leur perception jusqu'à ce qu'ils ne voient plus le bouton au même endroit qu'avant. D'après Ernst & Bühlhoff [2004], la perception manque de robustesse dans ce type d'environnement et peut aisément se biaiser. Une recalibration simple de la perception, expliquée dans la discussion, a été une solution à ce problème. 6 sujets ont eu besoin de recalibrer leur perception en phase X, un seul en phase Y.
- **Le manque de confiance** est aussi un biais majeur. Même en ne tenant pas compte des interactions ralenties par un défaut évident de robustesse, les interactions de la phase X ont été significativement plus lentes que celles de la phase Y, elles-mêmes plus lentes que celles de la phase Z. Les sujets ne sont pas aussi résolus avec un système virtuel, particulièrement s'il est intangible, et ils ralentissent leurs mouvements en conséquence. Les disparités sont aussi plus élevées, visibles par une valeur bien plus haute des écart-types.

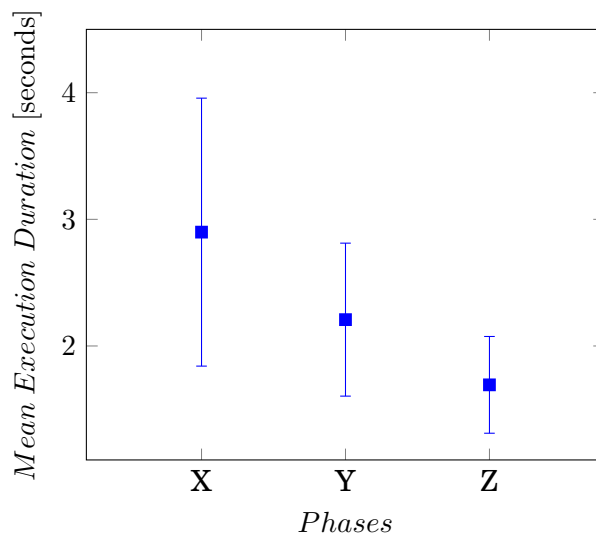


FIGURE 6.6 – Temps d'exécution moyen de chaque sujet. À part pour quelques points, nous observons une tendance globale où la phase Z est plus rapide que la phase Y, elle-même plus rapide que la phase X.

6.5.2 Erreur Relative

La variance de l'erreur relative moyenne est représentée figure 6.7. L'erreur relative a été mesurée pour chaque interaction et représente l'écart relatif entre le centre du bouton et la position de l'interaction. Lors des phases virtuelles (X et Y), ces valeurs sont sensibles à la qualité du tracking, mais la précision présumée sous 1mm de A.R.T. Fingertracking a été concluante. De plus, nous avons préférentiellement analysé les variances des grandeurs pour se dissocier d'écarts constants causés par un décalage du tracking. Ainsi, nous prenons en compte la répétabilité plutôt que la finesse dans notre critère de performance.

Tandis que la phase physique Z et la phase virtuelle tangible Y ont approximativement la même variance moyenne sur l'erreur relative, la phase X intangible obtient des valeurs significativement plus élevées. Les disparités sont aussi à nouveaux plus élevées pour cette phase, avec une variance des variances significativement supérieure.

Ces différences sont principalement induites par les incertitudes et les décalages visuels qui apparaissent durant cette phase. Plusieurs sujets ont rapporté avoir perçu le bouton s'éloigner de plus en plus, jusqu'à ce que leurs interactions ne fonctionnent plus. Sur le poste de contrôle, nous pouvions observer leurs interactions se décaler petit à petit d'un côté de l'interface, jusqu'à ne plus atteindre le bouton visé. En percevant le bouton de plus en plus profondément et comme son mouvement n'est pas perpendiculaire à l'écran, le sujet intersecte le moteur d'interactions plus tôt ou plus tard qu'il ne le pense, et en résulte un décalage latéral. Le logiciel est conçu pour que les sujets ne perçoivent pas leur erreur, mais seulement le fait qu'ils touchent le bouton ou non.

Pour finir, nous observons sur le graphe 6.7 que la variance des variances des erreurs relatives est plus élevée pendant la phase Z. Nous pensons que ce résultat vient d'une moins grande concentration des sujets pendant cette phase, à cause d'une grande familiarité avec l'écran tactile de la tablette. Même après leur avoir répété de viser le centre des boutons, les sujets étaient moins concentrés durant cette phase.

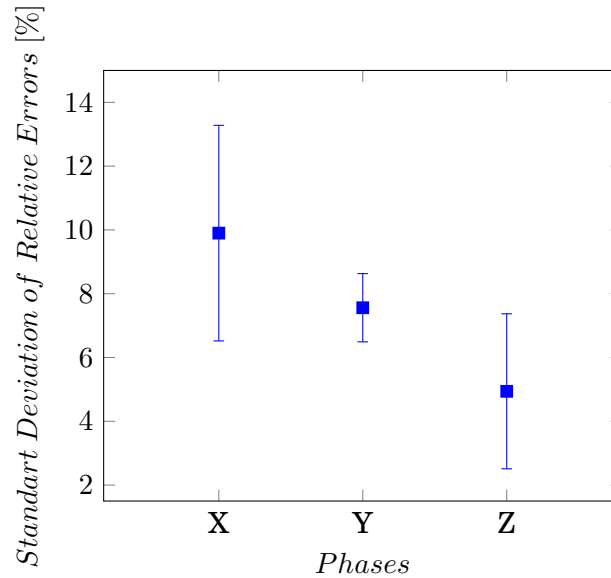


FIGURE 6.7 – Écart-type des erreurs relatives pour chaque sujet. À nouveau, si quelques sujets ont pu être efficace pendant les phases X et Y, la plupart ont manqué de finesse et de régularité.

6.5.3 Opinion des sujets

Chaque modalité a reçu des commentaires spécifiques récurrents de la part des sujets. Ce paragraphe se base sur les 2 types de questionnaires remplis par les sujets, leurs commentaires, et leurs verbatims.

Mode virtuel intangible (phase X)

Ce mode est le plus frustrant pour les sujets qui pensent parfois avoir touché le bouton alors que l'interaction n'est pas prise en compte par le système. Lorsque ce problème ne se pose pas, les sujets décrivent cette modalité comme "*étonnamment agréable à utiliser*", et les changements de couleurs sont appréciés. Plusieurs sujets ont apprécié qu'il y ait plusieurs changements de couleurs, un à l'appui et un au relâchement du bouton.

Mode virtuel tangible (phase Y)

La possibilité de ne plus se concentrer sur la profondeur grâce à un repère kinesthésique absolu, et ainsi de diminuer les incertitudes sur cette dimension, a été jugée pratique par les sujets. Les sujets étaient également satisfaits d'avoir eu moins de difficultés à interagir avec ce système. Cependant, quelques défauts mineurs ont été relevés :

- Il faut parfois exercer une légère pression sur la vitre lorsque le système ne réagit pas, à cause de l'aspect discret du tracking.
- Si la plupart des sujets étaient satisfaits de leur positionnement de la vitre, cette calibration initiale s'avère d'importance et peut être fastidieuse.
- La structure du gant de tracking A.R.T. peut parfois interférer entre la pulpe du doigt et la vitre, selon le mouvement du sujet.
- La vitre et sa potence manquent de rigidité, et bougent si l'on appuie trop fort.

Mode physique (phase Z)

Si la tablette procure les interactions les plus performantes, elle rompt totalement avec l'environnement virtuel. Ses bords sont trop noirs, son écran est trop lumineux, l'immersion se trouve si dégradée que des sujets ont demandé quelle était l'utilité du CAVE dans ce cas précis. La performance est là, mais immersion et présence sont rompues. Ces sujets auraient même préféré être simplement à leur bureau, sans expérience immersive. D'un autre côté, les sujets qui recherchaient une expérience immersive ont été déçus de cette phase, facile à compléter mais désagréable et en marge des autres phases.

6.5.4 Questionnaires

La phase Y obtient des scores significativement supérieurs (de l'ordre de 50%) à ceux de la phase X dans le questionnaire spécifique à la modalité haptique. Ce questionnaire est principalement axé sur la confiance dans les performances, la gêne occasionnée, la qualité de l'expérience. Après considération de ces résultats ajoutés à ceux des données brutes de performances, nous présumons que la vitre transparente passive a aidé les sujets dans leurs interactions.

Perception de latence – Malgré que la latence du système soit connue, nous avons demandé aux sujets de noter le délai qu'ils ont ressenti entre 1 et 7. La latence perçue suit étonnamment les performances, car les sujets les moins efficaces mettent souvent leur sous-performance sur le compte de latences. Pour ces raisons, le score moyen de latence est bien meilleur en phase tangible qu'en phase intangible. D'un autre côté, les sujets qui n'ont pas eu de difficultés rapportent une latence détectable, mais minime.

Confiance en soi – La confiance en soi est un facteur important pour les ingénieurs qui doivent avoir foi en les choix qu'ils font s'ils peuvent avoir de lourdes conséquences. En tant qu'outil de travail, la RV doit être au moins aussi fiable que les outils qu'elle veut être amenée à remplacer. Dans les questionnaires de présence, nous demandons au sujet de noter leur "*sentiment d'être compétent*" de 1 à 7 pour chaque modalité d'interaction. Nous obtenons des différences significatives ($p < 0.05$) entre les phases virtuelles tangibles et intangibles, comme en atteste la figure 6.8.

Le reste du questionnaire de présence est moins concluant. Notamment, la phase Z a un score légèrement supérieur à celui de la phase Y en moyenne, alors que tant de sujets se sont plein d'un fort déficit d'immersion.

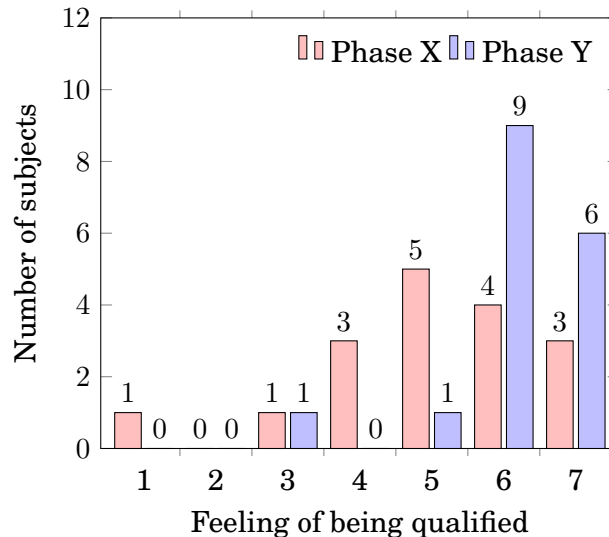


FIGURE 6.8 – Le sentiment d’être compétent des sujets, entre les phases X et Y.

6.6 Discussion

6.6.1 Système favori

Dans cette expérimentation, aucun des modes haptiques ne fait l’unanimité. Chaque mode est plébiscité par approximativement un tiers des sujets, indépendamment des différences d’utilisabilité mises en évidence dans les résultats. En leur demandant de défendre leur point de vue, nous observons que dès leur entrée dans le système, chaque sujet a sa propre idée de la pertinence de ce dispositif au service d’un cas d’usage particulier. Ces idées guident leur préférence en sélectionnant un mode particulièrement adapté à leur besoin. En fonction de quelle est leur confiance dans les technologies de réalité virtuelle et de leurs connaissances du développement d’IHM pour intérieur de véhicules, ils font presque leur choix avant de tester le système.

- Les sujets qui ont préféré la phase métaphorique (X) étaient plutôt des experts en RV qui attendaient un système interactif, pas nécessairement dans un contexte de développement d’IHM. Le dispositif était pour eux un module d’interaction pour CAVE applicable à différents métiers.
- Les sujets qui ont préféré la plaque transparente (Phase Y) étaient des experts autant que des novices de la RV. Ils appréciaient le retour d’effort tangible et précis qui opposait leur mouvement. De leur avis, ils testaient une IHM de véhicule en contexte comme s’ils étaient dans une vraie voiture pour simuler des conditions réelles.
- Les sujets qui ont préféré la tablette (Phase Z) se demandaient pourquoi utiliser de la réalité virtuelle pour du développement d’IHM. Ils ne portaient pas leur attention au reste du CAVE et auraient préféré être simplement à leur bureau avec la tablette.

Cette étude met en lumière la nécessité d’adapter l’implémentation de modalités haptiques aux cas d’usages précis auquel on souhaite répondre. Le facteur performance, qui a fourni à la phase Y les meilleures appréciations, est aussi à considérer.

6.6.2 Recalibrations

Beaucoup de sujets ont vu leur perception dériver au cours de l'expérimentation, particulièrement pendant la phase X, perdant leurs repères dans l'environnement virtuel action après action. Passé un moment, la localisation visuelle des boutons avait trop varié et leurs actions échouaient toutes.

Nous avons alors tenté de les faire recalibrer leur perception au moyen d'une démarche simple. Il leur a été demandé de faire une pause d'une minute, de regarder autour d'eux, leurs mains, l'extérieur du CAVE, le reste de l'environnement virtuel, et de fermer les yeux quelques secondes. Après ces quelques actions, 5 sujets sur les 7 qui ont effectué cette recalibration sont parvenus à continuer l'expérimentation.

Ces recalibrations n'ont été nécessaires qu'une seule fois pendant la phase Y. Nous présumons que la plaque transparente tangible est un repère de profondeur fort sur lequel la perception des sujets s'appuie avec plus de fiabilité.

6.6.3 Disparités entre les sujets

Comme nous l'avons vu précédemment, si les performances sont différentes entre les phases X et Y, la disparité entre les sujets a aussi été une différence majeure. Que ce soit pour l'écart-type des temps d'exécution ou celui des écart-types des erreurs relatives, les valeurs sont significativement supérieures dans la phase X par rapport à la phase Y. Nous expliquons cela par une plus grande difficulté à utiliser le mode métaphorique, ce qui accentue les différents niveaux d'adaptabilité entre les sujets. Comme l'on peut s'y attendre, les sujets familiers avec les CAVEs, la visualisation stéréoscopique ou les interactions virtuelles ont le plus de facilités à être performants, tandis que les novices et les sujets peu habitués à utiliser des interfaces tactiles ont eu plus de difficultés. L'aspect tangible a permis aux novices d'atteindre des performances supérieures.

6.6.4 Apprentissage In-the-Loop (AIL)

Avec quelques sujets, nous avons testé un processus simple d'AIL en phase Y : pendant les interactions, l'opérateur indiquait oralement au sujet quelle était son erreur pour chaque action (forte dérive à droite, petite dérive en haut, etc.). Les résultats ont été impressionnants et les sujets ont été capables d'être aussi précis qu'avec la tablette réelle, nous seulement en écart-type mais aussi et surtout en finesse, après seulement une dizaine d'interactions guidées et ce même après l'arrêt du guidage. Une vraie expérimentation avec différents indices d'AIL basés sur du logiciel sera certainement du plus grand intérêt. Cependant, pour synchroniser la perception des sujets avec le visuel et le système de localisation, nous ne sommes pas limités à apprendre aux utilisateurs à adapter leur perception par guidage oral ou visuel. Un système logiciel auto-correcteur robuste serait un choix plus judicieux, délestant le sujet de la surcharge cognitive associée à ces opérations, mais nécessite à nouveau une étude dédiée pour être efficace et fiable.

6.6.5 Influence du contexte

Cette étude a été effectuée en statique, et ses résultats ne sont pas nécessairement les mêmes dans un contexte autre. Notre feuille de route nous amènera aussi à les confirmer en situation de conduite. Nous prévoyons des résultats différents, pour deux raisons principales.

- Interagir avec une IHM n'est pas une tâche d'aussi haute priorité que la sécurité. Les utilisateurs ne peuvent se permettre de conserver leur regard trop longtemps sur l'IHM et ils compensent soit par de nombreux aller retours du regard, soit par l'utilisation de la vision périphérique, qui n'est pas aussi efficace que la vision centrale sur bien des aspects [Soichiando *et al.*, 2001; Strasburger *et al.*, 2011].
- Un environnement dynamique aux éléments changeants permet de renouveler continuellement les indices de perception spatiale aux yeux du sujet. Cela pourrait réduire considérablement les dérives de perception auxquelles nous avons été confrontés et apporter une excellente contribution aux performances des systèmes haptiques les plus sensibles à ces problématiques.

6.7 Conclusion

Dans cette étude, nous avons comparé différentes modalités haptiques dans le cadre de la conception virtuelle d'IHM pour écran tactile de véhicule, dans le but de mesurer la valeur ajoutée d'une interface tangible. Nous avons testé un système d'interaction métaphorique basé sur des indices visuels discrets, un système haptique passif composé d'une vitre transparente, et une tablette physique incrustée dans l'environnement virtuel. Le système passif transparent a permis des améliorations significatives de l'utilisabilité comparé au système intangible exclusivement visuel, à travers des gains en finesse, en efficacité et en confiance pour une meilleure expérience utilisateur. Nous avons donc pu prouver que l'interface tangible proposée procure des indices haptiques spatiaux plus robustes. Pour finir, malgré de bonnes performances, la tablette n'a pas été bien acceptée comme interface naturelle par les sujets qui ont rapporté d'importantes chutes d'immersion.

Cette étude a fait l'objet d'un article de journal publié dans *IEEE Transactions on Haptics* [Lassagne *et al.*, 2017b], joint en annexe 1.1.

CHAPITRE 7

INFLUENCE DE LA DYNAMIQUE ET DU CONTEXTE

7.1 Approfondir la simulation

Les problématiques révélées ou confirmées par la première étude, notamment le manque de robustesse de la perception spatiale, s'avèrent critiques. Elles sont bloquantes dès lors que l'on souhaite implémenter des interactions fiables à un outil de travail, et non plus à une preuve de concept. Les capacités des ingénieurs à prendre des décisions importantes sont limitées si l'outil n'est pas robuste. La confiance dans l'outil est étroitement corrélée à la réussite des tâches, qui n'était pas toujours concluante lors de l'expérimentation décrite dans la partie 6.

Cependant, les résultats de cette expérimentation ont permis d'identifier des causes possibles des basses performances du système. L'aspect statique de la simulation notamment, avec une unique tâche sur laquelle se concentrer, n'est pas représentatif des situations réelles, et quelques essais préliminaires ont laissé supposer qu'une simulation dynamique pouvait engendrer des résultats autres. Dans l'optique de se placer au plus près de conditions plus réalistes pour évaluer correctement nos systèmes d'interaction, une nouvelle expérimentation est nécessaire.

7.2 Objectifs et questions de recherche

L'expérimentation qui suit a pour objectif d'évaluer l'influence du contexte sur différentes modalités haptiques, en environnements immersifs. Deux situations sont évaluées :

- Une situation statique – les sujets sont dans un véhicule virtuel dans un environnement immersif. Ils interagissent avec l'écran tactile de la console centrale.
- Une situation dynamique – Les sujets conduisent le même véhicule, et doivent également interagir avec l'écran tactile de la console centrale.

Nous souhaitons analyser l'influence de la tâche de conduite et d'un environnement dynamique sur les performances et l'utilisabilité des systèmes d'interaction, comparés au

contexte statique étudié parallèlement. Les questions de recherche sont les suivantes :

- Dans quelle mesure un environnement dynamique et une tâche de conduite peuvent modifier l'utilisabilité d'une interface homme-machine (IHM) virtuelle ?
- Quelle est la dépendance de ces variations vis-à-vis de modalités haptiques connues et évaluées ?

7.2.1 Hypothèses préliminaires

L'expérimentation précédente a permis de mettre en évidence d'importantes dérives de la perception spatiale, qui ont mené à des baisses significatives de la performance lors d'interactions sans retour tangible [Lassagne *et al.*, 2017b]. Dès lors qu'une seconde tâche est introduite dans ce nouveau protocole, il est possible que la distraction induite rende les performances encore plus faibles, mais aussi qu'elle renforce les performances grâce à une implication plus forte des sujets. S'ajoute à cela l'environnement dynamique, dans lequel les indices de perception visuels sont continuellement renouvelés, qui peut participer à rendre la perception plus robuste. Cette dernière hypothèse a été étudiée par le passé par Atkins *et al.* [2001, 2003] qui ont pu améliorer la cohérence entre visuel et haptique grâce à un environnement dynamique. Cependant, l'étude ne dit pas en combien de temps la recalibration visuelle s'effectue ni ne précise ou ne quantifie l'implication des sujets dans leur environnement.

7.3 Variations dans le processus expérimental

Cette étude ajoute une dimension de conduite à l'apparatus précédent. SCANeR Studio© est à nouveau sollicité pour calculer et afficher le visuel, ainsi que pour l'interfaçage avec un système de conduite manuelle Logitech G25 (figure 7.1). L'environnement est routier, et la vitesse des véhicules est limitée à 30km/h. Cette vitesse a été arbitrairement choisie pour que les mécaniques de la conduite ne biaisent pas le temps d'exécution dans une phase de conduite complexe : les sujets doivent par exemple pouvoir interagir sans difficulté qu'ils soient en ligne droite ou en virage.

Cette implémentation permet la mise en situation dynamique des sujets, mais les soumet à une distraction continue et homogène.

Nous avons décidé d'ajouter une troisième échelle, plus petite que les deux précédente, suivant l'hypothèse selon laquelle les performances seraient améliorées et nécessiteraient une échelle d'évaluation plus fine. Comme la phase physique de la première expérimentation n'est pas reconduite, cette étude comporte à nouveau 6 séries d'interactions par sujet :

- 3 échelles avec le système d'interaction intangible basé sur la substitution sensorielle (changements de couleur)
- 3 échelles avec le système haptique passif tangible implémenté par une vitre transparente.

Pour finir, afin d'éviter qu'un sujet concentré sur la conduite ne voit la sollicitation d'interaction tardivement, un signal sonore a été ajouté. Le signal sonore se manifeste lorsque l'un des boutons devient vert.

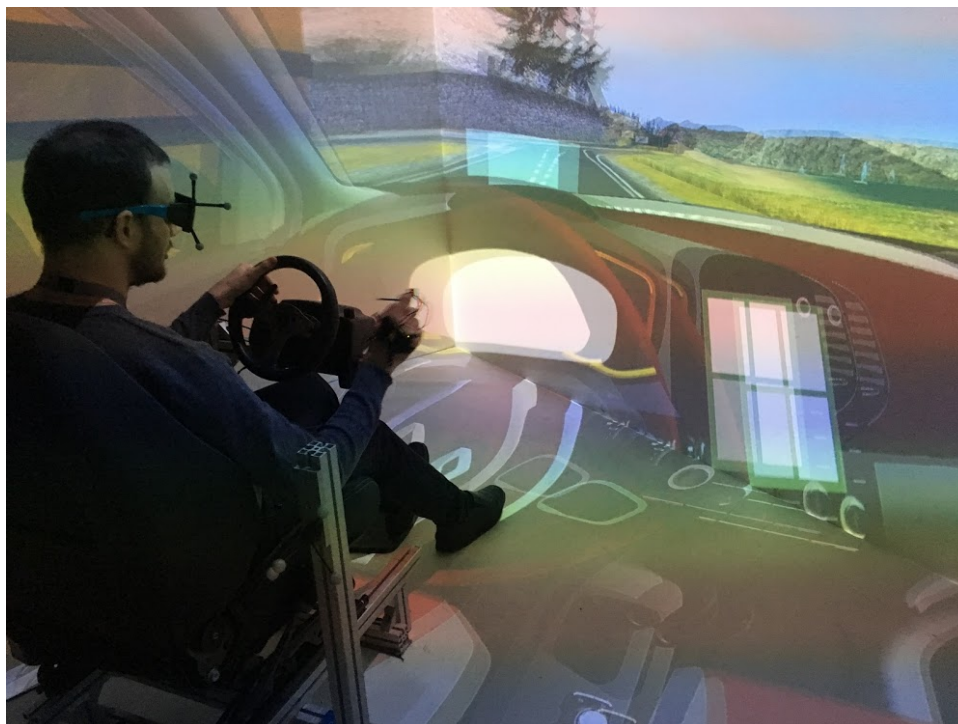


FIGURE 7.1 – Un sujet en pleine simulation, conduisant avec le volant et les pédales pendant qu’il interagit.



FIGURE 7.2 – Les trois différentes échelles utilisées en contexte. *La troisième interface, avec l’un des boutons au vert, est en attente d’une interaction.*

11 sujets ont pris part à cette seconde expérimentation. Les résultats présentés dans la suite de ce paragraphe comparent les données acquises pendant cette étude dynamique avec celles de l'étude statique du chapitre 6.

7.4 Résultats

7.4.1 Temps d'exécution

La figure 7.3 représente la distribution du temps d'exécution des sujets pendant les phases statiques et dynamiques, pour la modalités intangible (changements de couleurs) et la modalité tangible (vitre transparente passive).

Pour rappel, l'étude statique a montré des différences importantes des temps d'exécution entre les systèmes tangibles et intangibles. Le contexte de la simulation de conduite, et les différences qu'il implique, apporte les résultats suivants :

- Les interactions avec le système intangible sont significativement plus rapides lorsque les sujets conduisent.
- Les temps d'exécution avec le système tangible ont également diminué lors de la conduite, mais de façon moins visibles. Le système tangible a de toute façon un potentiel d'amélioration plus bas, car il procure des performances plus élevées en statique.
- La variance des temps d'exécution baisse considérablement lors de l'utilisation du système intangible en situation de conduite (les sujets sont plus réguliers).

Pour chacune des deux modalités haptiques, les plus hautes performances sont atteintes en contexte dynamique, c'est-à-dire en conduisant. De plus, contrairement à ce qui a été observé en situation statique, il n'y a pas de différence significative entre les deux systèmes d'interaction, dès lors que les valeurs moyennes et les variances sont proches. Les conditions dynamiques sont particulièrement bénéfiques à la substitution sensorielle, qui atteint un niveau de performances proche de celui de l'haptique tangible.

Robustesse – La fiabilité insuffisante avait été un obstacle majeur pour les sujets interagissant en statique. Particulièrement sans haptique tangible, les temps d'exécution étaient dégradés par des défauts de perception spatiale, problématiques lors d'interactions avec les boutons les plus petits. Les sujets n'arrivaient parfois pas du tout à atteindre les boutons tant leur perception manquait de robustesse.

Dans l'étude dynamique, ce problème ne s'est pas posé et les sujets ont toujours réalisé leurs interactions du premier coup. De plus, l'ajout d'une nouvelle taille de boutons, deux fois plus petite que la petite taille précédente, n'a posé de difficultés à aucun sujet. En contexte de simulation de conduite, aucun sujet ne s'est plaint de la fiabilité des interactions, tandis que la moitié d'entre eux s'en étaient plaint en statique. La réduction de variance laisse également supposer que le système est plus simple à appréhender en dynamique, menant à moins de disparités entre les sujets.

7.4.2 Erreur relative

Finesse – La figure 7.4 représente la distribution de l'erreur relative entre les sujets pendant les phases statiques et dynamiques, pour les modalités tangibles et intangibles. Les tendances identifiées avec les temps d'exécution concordent avec les résultats suivants.

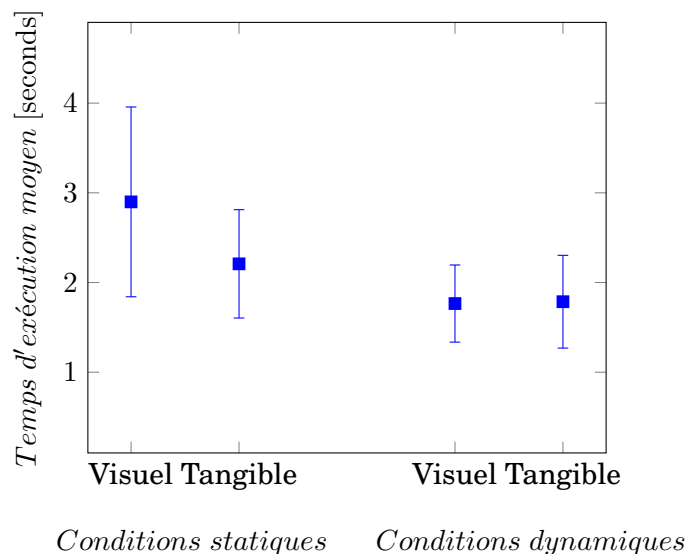


FIGURE 7.3 – Temps d'exécution moyen des sujets en contexte statique et dynamique pour les modalités intangible (visuel) et tangible (haptique).

Tandis que l'interface intangible a sous-performé lors des études statiques, celle-ci a largement bénéficié du contexte dynamique de simulation de conduite. Dans ces conditions, les sujets ont presque pu atteindre le même niveau de performance avec ce système qu'avec le système tangible. Les performances du système tangible ont également progressé, et la variance des erreurs est toujours inférieure lorsque les sujets utilisent ce dernier.

Précision et disparités entre les sujets – La variance des écarts relatifs, illustrée figure 7.5, est un outil de mesure de la répétabilité des sujets indépendamment d'autres biais (comme des décalages liés au tracking). La précision avec le système d'interaction intangible s'améliore significativement en contexte dynamique. Les interactions tangibles procuraient déjà une bonne précision en statique, mais bénéficient tout de même d'une amélioration de leurs performances en dynamique.

Les disparités ont diminué en contexte de simulation de conduite, quelle que soit la modalité haptique, quantifiées par une diminution de la variance des variances moyennes des erreurs relatives sur la figure 7.5. Encore une fois, c'est le mode d'interaction intangible qui fait les progrès les plus importants.

7.4.3 Opinion des sujets

Tous les sujets ont rapporté ne pas avoir rencontré de difficultés pour interagir en conduisant. Ils ont accompli les interactions avec la plus petite des interfaces (absente en statique) avec succès, et étaient surpris d'apprendre que l'interface de taille moyenne avait posé tant de problèmes en statique.

Dans les questionnaires, les sujets ont attribué des scores supérieurs à la question "Avez-vous trouvé que cette interface est utilisable convenablement ?" pour le système tangible (figure 7.6). Cependant, une majorité de sujets affirment préférer le système intangible pour des raisons diverses.

- Mise en place plus simple : la vitre passive doit être replacée finement pour chaque sujet et lors de chaque changement de scène, alors que son positionnement a une

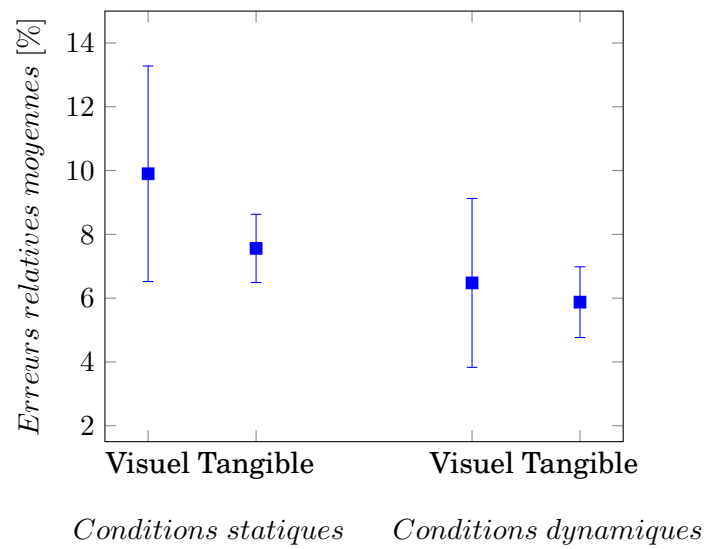


FIGURE 7.4 – Erreur relative moyenne en contexte statique et dynamique pour les modalités intangible (visuel) et tangible (haptique)

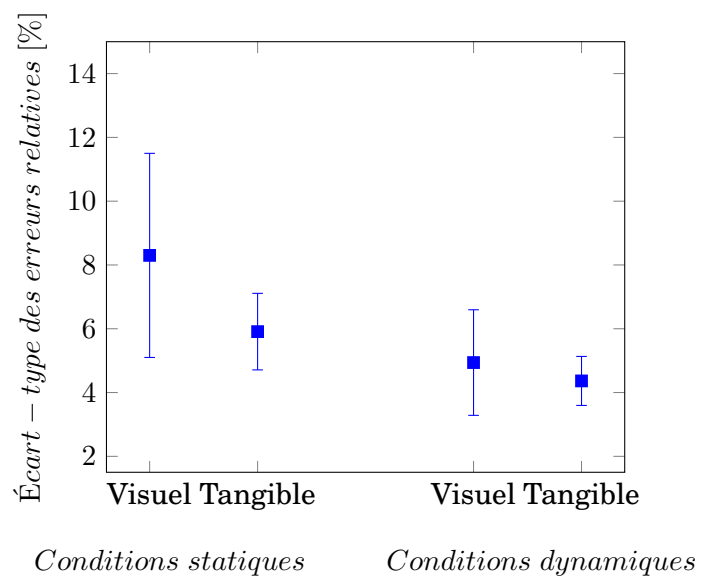


FIGURE 7.5 – Variances moyennes des erreurs relatives.

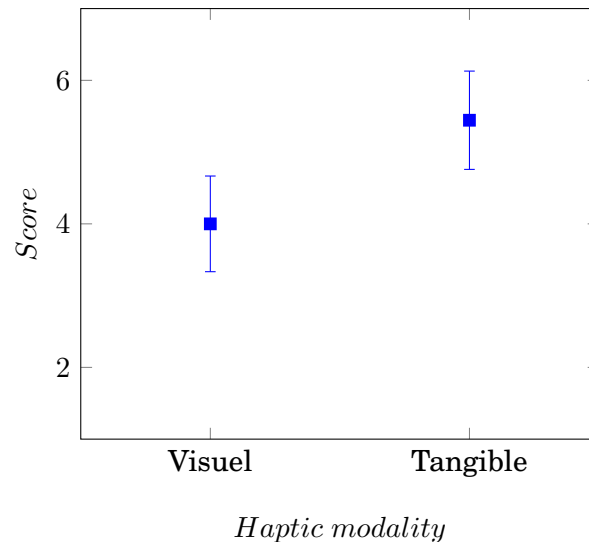


FIGURE 7.6 – La question *Avez-vous trouvé que cette interface est utilisable convenablement ?* notée de 1 à 7 pour chaque modalité.

influence importante sur les performances. 2 à 5 minutes sont en général requises pour placer cette vitre correctement la première fois.

- Faux positifs : certains sujets déclarent que les interactions tangibles peuvent être frustrantes à cause des faux-positifs. Le retour haptique étant passif, il est entièrement décorrélé de la prise en compte ou non de l'interaction par le système, et il peut donc arriver qu'un sujet touche la vitre sans que l'interaction ne fonctionne.
- Contraintes : la plupart des sujets anticipent d'autres cas d'usage qui vont rapidement au-delà d'interactions avec un objet statique, plan et aux dimensions limitées. En cela, la substitution sensorielle autorise beaucoup plus de flexibilité que l'haptique passive.
- Ressenti : les pièces en plastiques du gant de tracking peuvent s'interposer entre la pulpe du doigt et la vitre. En ajoutant à cela le manque de rigidité de la vitre, l'haptique passive peut sembler imparfaite et frustrante.

D'un autre côté, quelques sujets rapportent qu'une interaction échouée avec la modalité intangible engendre une forte chute de confiance dans le système, n'ayant eu aucun retour. Il peut être difficile de conserver une perception robuste après avoir échoué une ou plusieurs interactions, le système ne communiquant pas sur les causes de ces échecs.

7.5 Discussion

7.5.1 Perception spatiale

Le principal facteur influant les performances que nous avons identifié est la perception spatiale, affaiblie par des informations sensorielles peu fiables. Des imprécisions dans la perception mènent à des imprécisions dans les actions, une confiance en soi plus basse, et un déficit d'utilisabilité. Les sujets de ces études ont été moins confrontés à ces problématiques dès lors que le contexte n'était plus statique, pour diverses raisons présumées.

Indices de perception spatiale – La tâche de conduite force les sujets à se concentrer continuellement sur leur environnement pour éviter d’avoir un accident, tandis que les sujets qui interagissent en statiques peuvent garder les yeux sur l’IHM. Or, des indices spatiaux sont répartis dans tout l’environnement (des objets de taille connue, des chevauchements, etc.). Les sujets qui se concentrent sur l’environnement perçoivent naturellement plus d’indices.

De plus, en dynamique, l’environnement varie au fur et à mesure que le véhicule se déplace. Les indices sont renouvelés mais aussi les points de vue, les lumières, la parallaxe. Comme attendu, un environnement dynamique procure plus de redondance dans la perception des distances, et la rend ainsi plus robuste.

Plusieurs approches visuelles – La théorie des deux canaux visuels [Goodale & Milner, 1992] présume que l’homme utilise deux différents canaux pour sa perception visuelle, le *Quoi ?* et le *Où ?*, avec des caractéristiques différentes. Sensibilité, mémoire, vitesse, conscience et même fonction sont différents. L’utilisation de l’un ou de l’autre de ces canaux peut avoir un impact fort sur les performances, comme décrit par Lohse *et al.* [2010] dans une étude où le focus de l’attention varie entre les canaux. De façon analogue, les conditions dynamiques sollicitent différemment ces canaux, plus intensivement et avec une répartition différente.

La direction du regard change également lors d’interaction en conduisant. En mode statique, les sujets peuvent garder une vision droite et centrale, tandis que la conduite les force à varier entre vision droite et latérale, centrale et périphérique, en plus des mouvements de la tête. Ces mouvements ajoutent des indices de parallaxe, et la vision latérale apporte de nouveaux points de vue pour rendre la perception plus robuste.

Dérives de la synchronisation visuo-haptique – Les différences morphologiques des sujets sont responsables de biais dans le calcul des pyramides de vision. La calibration subjective utilisée dans cette étude permet une synchronisation visuo-haptique satisfaisante dans la configuration de la calibration seulement, souvent en vision droite. Tandis que certains sujets restent dans la même configuration que pour la calibration pendant la conduite, certains change leur stratégie de vision (par exemple en ne bougeant plus la tête, mais seulement les yeux). Ces sujets sont confrontés à des décalages constants de leurs interactions, comme si la calibration était incorrecte.

Les méthodes de calibrations subjectives ne sont pas suffisamment satisfaisantes dans ce contexte, même si les calibrations analytiques se sont avérées plus imprécises encore dans des études préliminaires. Une méthode de calibration logicielle automatique et intelligente serait idéale.

7.5.2 Le choix du meilleur système d’interaction

La valeur ajoutée de l’interface tangible n’est pas concluante dans un contexte de simulation de conduite, tandis qu’elle l’était en statique. Les sujets ont effectué rigoureusement la même tâche, et la seule différence résidait dans la conduite. Par conséquent, l’importance de la corrélation entre la modalité haptique et le cas d’usage et son contexte doit être soulignée. S’inspirer du réel peut s’avérer contraignant et il faut d’abord choisir un système d’interaction selon le besoin en perception, en interactions et en performances.

Il n’existe pas encore de système haptique parfait pour tous les usages, mais leurs avantages individuels peuvent être optimisés pour des cas d’usage spécifiques.

7.6 Conclusions et implications

Une comparaison entre des systèmes d'interaction tangibles et exclusivement visuels apporte de nouvelles données sur la contribution des modalités haptiques dans un contexte dynamique. Les utilisabilités de deux implémentations, la première basée sur la substitution sensorielle et la seconde sur l'haptique passive, ont été évaluées en conditions de simulation de conduite par des mesures d'efficacité, de finesse et de satisfaction des sujets. Les résultats indiquent que les sujets ont significativement amélioré leurs performances en conditions dynamiques par rapport au cas statique utilisé comme référence. De plus, la valeur ajoutée de l'haptique tangible est beaucoup moins élevée en dynamique. Ces résultats apportent de nouvelles preuves que l'évaluation de modalités haptiques doit être menée dans un contexte dynamique et précisément défini pour correspondre à son utilisation future, tant la contribution de l'haptique peut être différente selon le contexte.

Cette étude a fait l'objet d'une communication lors de *Driving Simulation Conference 2017 VR Edition* [Lassagne *et al.*, 2017a], joint en annexe 1.2.

CHAPITRE 8

FILTRAGE LOGICIEL DE LA PERCEPTION SPATIALE

Les deux expérimentations précédentes ont élargi la connaissance sur la ductilité de la perception spatiale des sujets, fortement variable selon les personnes, environnements, contextes et systèmes utilisés. Jusqu'à présent, les solutions recherchées ont consisté à robustifier la perception, avec plus ou moins de succès, pour obtenir une meilleure coordination entre visuel et haptique. La prise en compte des données morphologiques des sujets est une des voies qui a fait ses preuves, mais non exempte de défauts. Enrichir les environnements virtuels a également été identifié comme un point important, de même que l'aspect dynamique des simulations. Cependant, il n'est pas toujours possible ou pertinent de concevoir un environnement optimisé pour maximiser la fiabilité de la perception spatiale.

La calibration subjective utilisée dans nos premières études est la première pierre d'un raisonnement inversé. Au lieu d'améliorer la perception pour qu'elle soit compatible avec le système, nous choisissons d'adapter le système. Cette méthode a fait ses preuves mais a aussi montré ses limites :

- Nos calibrations subjectives ajoutent une manipulation d'initialisation au début de la simulation, à reproduire pour chaque utilisateur.
- Ces calibrations se font dans une configuration donnée : en regardant dans une certaine direction, la tête inclinée suivant un certain angle, les lunettes posées de telle façon, etc. Sortir de cette configuration introduit immédiatement un biais.
- Ces calibrations se font à un instant donné (au début de la simulation) et ne tiennent donc pas compte des fluctuations ultérieures de la perception des sujets, pourtant manifestes.

Une fois ces problématiques constatées, l'idée est venue d'effectuer des recalibrations à chaque interaction, en temps réel. En partant du principe que les sujets visent naturellement le centre des boutons [Wang & Ren, 2009], et en filtrant leurs interactions pour les recentrer sur les boutons en fonction de paramètres appris par un système intelligent, on peut envisager d'améliorer les performances de notre système.

Cette étude a été menée en deux étapes.

- D'une part, le développement d'un algorithme de filtrage optimal, vérifié par la simulation,
- D'autre part, la validation de l'algorithme par une expérimentation avec de nouveaux sujets.

8.1 Élaboration de l'algorithme de filtrage par resimulation

Le principe de la resimulation est d'effectuer des simulations en grand nombre, en faisant varier un set de paramètres, à partir de données collectées sur un usage réel. Ici, il s'agit de réutiliser les données collectées lors des expérimentations précédentes, et de faire virtuellement repasser ces données en ajoutant nos algorithmes. On peut ainsi tester ceux-ci et les améliorer, puis recommencer, jusqu'à obtenir les performances recherchées. La resimulation permet de faire passer un sujet des milliers de fois sur plusieurs configurations, en quelques secondes de calcul.

8.1.1 Algorithmie

L'idée est de recalibrer le moteur d'interaction en temps réel, en suivant certaines contraintes.

- Le visuel ne doit pas bouger pour l'utilisateur, l'opération est invisible.
- Le système ne doit pas pouvoir trop s'éloigner d'une position nominale.
- L'opération doit pouvoir se faire en temps réel et améliorer significativement les performances des interactions.

Nous avons donc décidé de séparer les boutons de l'interface en deux éléments, le visuel et la logique. L'utilisateur voit le visuel du bouton mais agit sur sa logique, comme décrit sur la figure 8.1. L'utilité de recentrer la logique n'est pas évidente sur ce schéma, car les interactions ont touché le bouton dans les deux cas. Néanmoins, le recentrage du bouton autour des interactions permet que des interactions moins précises aient de meilleures chances d'atteindre le bouton.

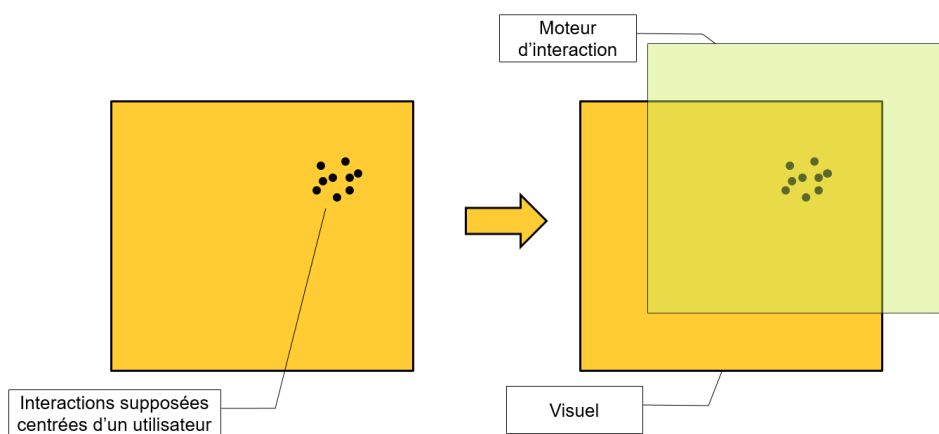


FIGURE 8.1 – Séparation d'un bouton virtuel en un visuel et une logique. À droite, l'utilisateur a théoriquement touché le bouton en son centre

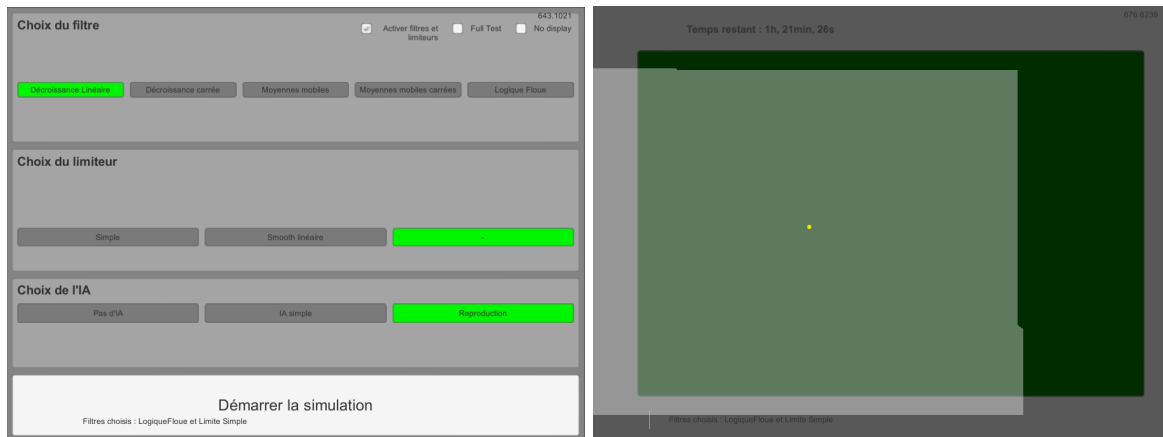


FIGURE 8.2 – Le logiciel de resimulation utilisé pour la conception et l’optimisation des algorithmes de filtrages.

Pourquoi ne pas plutôt recalibrer logiquement la position des yeux, si c’est la source des erreurs ? En fait, ce serait l’idéal. Cependant, comme expliqué dans la partie 5, les sources d’erreur de positionnement sont nombreuses (profondeur ou hauteur des yeux, IPD...) et le choix de correction n’est pas trivial. De plus, on ferait alors bouger le visuel, ce qui risque de dérouter les utilisateurs. Malgré tout, nous évoquons les possibilités de cette stratégie dans le paragraphe 8.3.

8.1.2 Resimulation

À des fins de tests, un logiciel de resimulation doté d’une interface graphique (destinée à la vérification visuelle) a été développé. Le logiciel en question, représenté figure 8.2, permet de repasser en boucle toutes les données collectées pendant les études précédentes, d’y appliquer un filtre et un limiteur, et de faire jouer des jeux de paramètres d’optimisation des filtres. A la fin de la resimulation, le logiciel génère un fichier XML qui synthétise les gains en performances apportés par les différents jeux de paramètres. Pour chaque session de test, les jeux de paramètres qui procurent des résultats aberrants (trop d’erreurs) sont écartés. Ceux qui fonctionnent voient leurs données comparées pour déterminer quel jeu est le plus efficace. Pour ne pas créer de dépendance vis-à-vis des données utilisées, nous n’avons pas poussé la précision trop loin et avons jugé qu’une expérimentation avec des sujets (et donc de nouvelles données) servirait à la validation.

8.1.3 Techniques de filtrage

Les méthodes de filtrages sont nombreuses et beaucoup sont sûrement adaptées à notre problématique. Le choix a été fait de tester plusieurs méthodes, de plus en plus complexes, pour mieux évaluer les contribution des algorithmes élémentaires. Dans toute la suite on appelle x l’erreur relative horizontale et y l’erreur relative verticale, (x_i, y_i) la position initiale du centre de la logique pour l’interaction i , et K, a, b, etc les valeurs caractéristiques des filtres.

Filtrage linéaire

La première méthode, la plus simple et la plus évidente, procure déjà des résultats intéressants. L'équation du filtrage est la suivante :

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + K(x - x_i) \\ y_{i+1} = y_i + K(y - y_i) \end{cases} \quad (8.1)$$

Le paramètre déterminé de façon expérimentale est de $K \in [0.2, 0.4]$, et les gains en performances sont, pour nos données, déjà assez importants. Cependant quelques limites sont déjà identifiées :

- Le système ne tient pas compte de l'erreur de l'humain qui n'atteint normalement pas le centre du bouton.
- Le système n'apprend pas et se comporte de la même façon si des erreurs se répètent ou si une interaction aberrante est effectuée.

Filtrage quadratique

Le filtrage quadratique, légère amélioration du filtrage linéaire, hérite de ses avantages et de ses défauts. Son équation, suivant les termes précédemment définis, est la suivante.

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + K * \sqrt[a]{x - x_i} \\ y_{i+1} = y_i + K * \sqrt[a]{y - y_i} \end{cases} \quad (8.2)$$

Les valeurs optimales obtenus par resimulation donnent un gain $K \in [0.94, 1.08]$ et la racine $a \in [0.16, 0.26]$

Filtrage par moyennes mobiles

Filtrer sur la moyenne mobile des m dernières interactions permet non seulement de lisser les légères erreurs humaines, mais également de ne pas tenir compte d'une interaction aberrante (le poids des autres valeurs de la mémoire permettant de stabiliser la position de la logique du bouton). Plus de paramètres sont ici à optimiser, à savoir la taille de la moyenne mobile m mais aussi les poids K_i de chaque valeur. L'équation caractéristique est la suivante :

$$\begin{cases} x_{i+1} = \frac{\sum_{k=i-m+1}^i (K_k * x_k)}{m} \\ y_{i+1} = \frac{\sum_{k=i-m+1}^i (K_k * y_k)}{m} \end{cases} \quad (8.3)$$

L'optimisation par resimulation a permis de montrer que la dernière interaction (d'indice i) doit avoir un poids légèrement supérieur aux autres, égale à 3 tandis que les autres valeurs ont un poids de 2.5. Ceci s'explique par une fiabilité généralement plus grande de la dernière interaction, en particulier si la perception dérive et qu'il faut rapidement corriger. Les simulations indiquent également que la moyenne mobile peut contenir entre 4 et 5 valeurs pour fournir un filtrage satisfaisant.

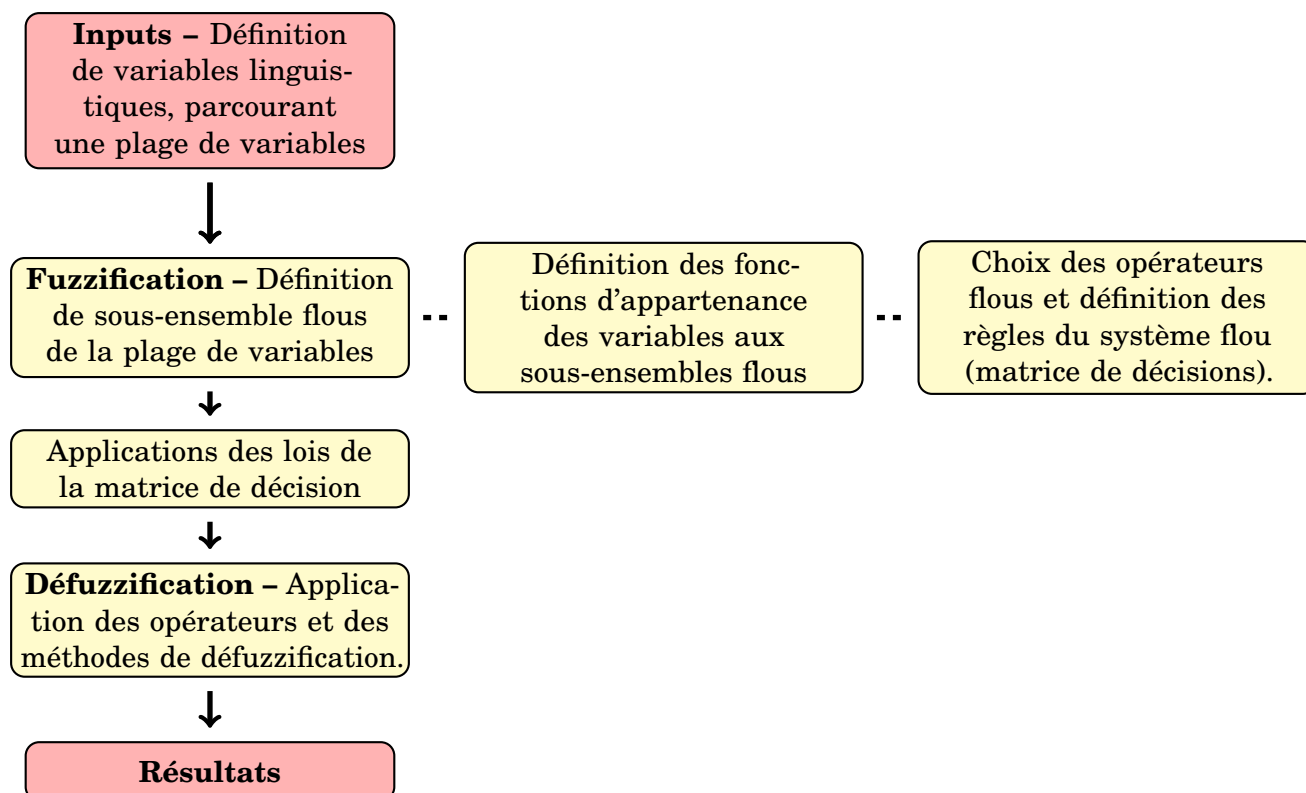


FIGURE 8.3 – Processus d’application de logique floue.

Logique floue

La logique floue est une extension de la logique classique, exploitée par les techniques de filtrage précédents, pertinente pour les raisonnements approchés. Dans notre cas, les erreurs humaines, normales et inévitables, se prêtent tout à fait à la conception d’un algorithme de logique floue. Le principe est décrit dans le logigramme 8.3.

L’application de cette méthode à notre situation fait l’objet de la section 8.1.3.

Autres méthodes de filtrage

Il existe de nombreuses méthodes éprouvées de filtrage qui sont utilisées dans tous les domaines. On peut notamment citer :

- Les correcteurs PID (Proportionnel Intégral Dérivé) [Aström & Hägglund, 1995], valeur sûre du réglage en dynamique et exploités par la plupart des besoins en pilotage, stabilisation, ou suiveurs dans l’industrie. Ces correcteurs ont une composante proportionnelle, une composante *intégrale* qui permet de mémoriser les erreurs passées et ainsi d’atteindre la consigne, et une composante *dérivée* qui permet d’accélérer la stabilisation en diminuant les oscillations autour de la consigne. La composante intégrale n’a pas de sens ici, puis que la consigne est fixe et qu’il n’y a pas d’erreur à rattraper. La composante dérivée est biaisée par les oscillations discrètes autour d’une position d’équilibre, le centre du bouton vu par l’utilisateur.
- Les filtres de kalman [Kalman & others, 1960] sont également utilisés pour la prévision de trajectoire, lorsque l’on a accès au modèle dynamique associé. Lors de l’implémentation d’une telle correction, chaque incrément de trajectoire est une somme

pondérée entre la valeur mesurée et la valeur prédite par le modèle. Ces filtres permettent de tenir compte des erreurs de mesure et des erreurs physiques. Tout comme le PID, le filtre de kalman est pertinent pour des usages dynamiques et l'implémentation de ce système, avec un modèle statique pour la composante physique, se stabilise rapidement en un correcteur linéaire dont le gain dépend des paramètres du filtre.

8.1.4 Limiter la dérive

En allant au-delà des optimisations obtenues par resimulation, on peut mettre en question le fait de trop dissocier le moteur physique du moteur visuel. Dans le cas d'erreurs trop importantes et d'une recorection rapide par la perception de l'utilisateur, le système pourrait être allé trop loin. Il a donc été décidé d'ajouter un limiteur à l'algorithme de filtrage pour le forcer à rester proche d'une position nominale. Deux types de limiteurs ont été testés.

- Un limiteur simple, qui contraint le système à ne pas s'éloigner de sa position nominale au-delà d'une distance déterminée.
- Un limiteur complexe, qui diminue graduellement les effets du filtrage lorsque le système s'éloigne trop de sa position nominale.

En resimulation, le limiteur complexe a permis de diminuer le nombre d'erreurs de 25%, au prix d'une baisse de performance négligeable sur le reste des interactions. Il est donc implémenté dans l'expérimentation qui suit.

Le limiteur simple a également permis de diminuer le nombre d'erreurs sur notre échantillon, mais au prix d'une plus importante baisse des performances.

8.1.5 Filtrage par logique floue

L'algorithme flou est celui qui a procuré les meilleurs résultats et qui est utilisée dans l'expérimentation. Notre raisonnement flou est décrit plus précisément ci-dessous. Son objectif, par rapport aux algorithmes précédents, est non seulement de garder en mémoire les réussites ou erreurs des utilisateurs (et d'en tenir compte), mais également de ne pas sur-réagir si ceux-ci ratent une interaction de temps en temps (l'erreur est humaine). Enfin, l'outil doit rattraper l'erreur plus rapidement si celle-ci se répète.

1. Les variables linguistiques considérées sont

- $(A, [-100, 100], \{Proche, Moyen, Loin\})$ – La proximité à la dernière interaction, associée à une erreur relative dans l'intervalle $[-100, 100]$, et aux sous-ensembles flous $\{Proche, Moyen, Loin\}$.
- $(B, [-100, 100], \{Proche, Moyen, Loin\})$ – La proximité à la moyenne mobile, associée à une erreur relative dans l'intervalle $[-100, 100]$, et aux sous-ensembles flous $\{Proche, Moyen, Loin\}$.
- $(X, [0, 100], \{Peu, Moyennement, Beaucoup\})$ – La correction à exercer par rapport à la dernière interaction.
- $(Y, [0, 100], \{Peu, Moyennement, Beaucoup\})$ – La correction à exercer par rapport à la dernière moyenne mobile.

Les ensembles flous A et B contiennent les entrées (les positions des interactions), tandis que les ensembles flous X et Y contiennent les sorties (les corrections à réaliser).

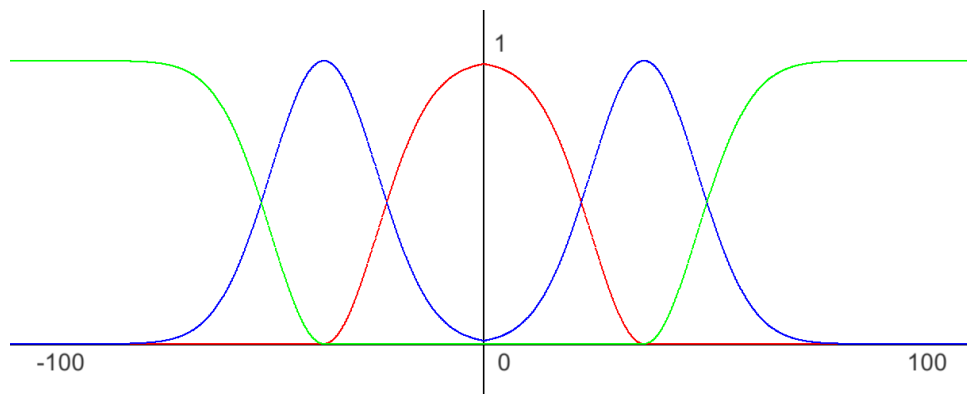


FIGURE 8.4 – Les fonctions d'appartenance aux sous-ensembles flous. L'équation suivie est $f(t) = \exp \frac{-1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right)^2$ avec μ la moyenne et σ l'écart-type.

2. Les fonctions d'appartenance aux variables A et B sont trois gaussiennes, dont la somme vaut 1 partout dans l'intervalle de valeurs $[-100, 100]$, illustrées figure 8.4. Les fonctions d'appartenance aux ensembles X et Y sont définies par la matrice de décisions.

3. Les opérateurs flous utilisés sont les opérateurs de Zadeh.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

4. La matrice de décisions est décrite ci-dessous. Soient les sous-ensembles flous suivants :

$$\begin{cases} A = \{Proche, Moyen, Loin\}_{derniere\ interaction} \\ B = \{Proche, Moyen, Loin\}_{derniere\ moyenne\ mobile} \\ X = \{Peu, Moyennement, Beaucoup\}_{derniere\ interaction} \\ Y = \{Peu, Moyennement, Beaucoup\}_{derniere\ moyenne\ mobile} \end{cases} \quad (8.4)$$

La fonction f_z régle l'appartenance de l'interaction faite par le sujet aux sous-ensembles flous X_0, X_1, X_2, Y_0, Y_1 et Y_2 en fonction des entrées A_0, A_1, A_2, B_0, B_1 et B_2 .

$$f_z = \sum_i f_z(X_i) + \sum_i f_z(Y_i) \quad (8.5)$$

$$\begin{cases} f_z(X_0) \in (A_0 \cap B_0) \cup (A_1 \cap B_0) \cup (A_2 \cap B_0) \\ f_z(X_1) \in (A_0 \cap B_1) \cup (A_1 \cap B_1) \\ f_z(X_2) \in (A_0 \cap B_2) \end{cases} \quad (8.6)$$

$$\begin{cases} f_z(Y_0) \in (A_0 \cap B_0) \cup (A_1 \cap B_0) \cup (A_2 \cap B_0) \\ f_z(Y_1) \in (A_0 \cap B_1) \cup (A_1 \cap B_1) \\ f_z(Y_2) \in (A_0 \cap B_2) \end{cases} \quad (8.7)$$

Les règles d'inférence ainsi conçues permettent de répondre au besoin exprimé en début de section. Par exemple, si la dernière interaction est loin des autres, le système va peu corriger ; si la suivante est au même endroit (donc proche de la dernière interaction mais loin de la moyenne mobile), le système va corriger plus rapidement.

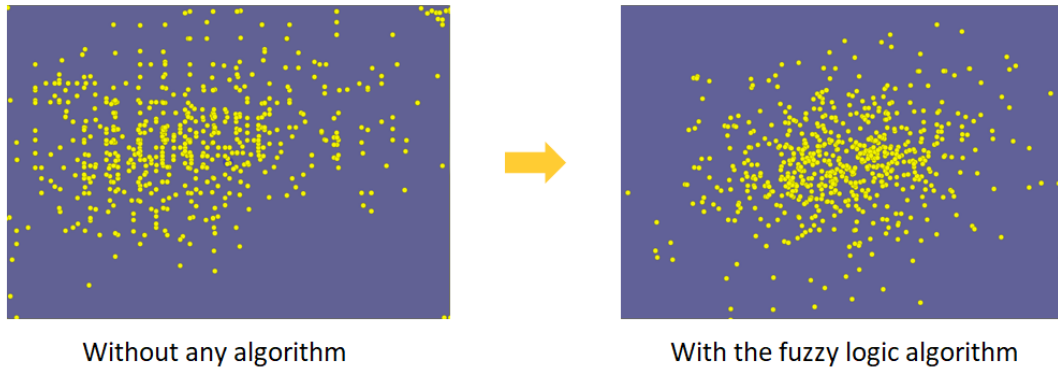


FIGURE 8.5 – Le nuage de points des interactions des sujets, avant et après filtrage. *En plus du recentrage manifeste des points, il faut se rappeler que de nombreuses interactions ont été échouées par les sujets. Peut-être le filtrage améliorera-t-il la situation.*

Les 6 fonctions partielles $f_z(X_i)$ et $f_z(Y_i)$ effectuent chacune une correction linéaire de gain K_i vers respectivement le lieu de la dernière interaction et celui de la dernière moyenne mobile. Les gains K_i sont les paramètres à optimiser, en plus de la largeur des sous-ensembles flous. Le plus une interaction appartient à un ensemble flou, le plus le gain de la fonction partielle associée à l'ensemble flou est important.

$$f_z(X_i)(x) = K_i(x, y) * x \quad (8.8)$$

L'optimisation réalisée en resimulation a livré les valeurs $\mu = 50$ et $\sigma = 15$ pour les gaussiennes des fonctions d'appartenance. Les valeurs de K optimisées sont les suivantes :

$$\begin{cases} K_0 = 0.215 \\ K_1 = 0.41 \\ K_2 = 0.69 \end{cases}$$

L'utilisation de ces paramètres permet des simulations encourageantes. En utilisant les données des expérimentations précédentes, nous obtenons le nuage de point filtré illustré figure 8.5. Le résultat est prometteur, et aller plus loin nécessite de faire une expérimentation réelle. Ainsi, nous pourrions quantifier plus précisément l'apport du dispositif.

8.2 Validation du filtrage par l'expérimentation

Au-delà des résultats théoriques obtenus par resimulation, une expérimentation a été menée avec 15 sujets pour confirmer l'intérêt de ce type de solution. Cette expérimentation a été conçue sur le même principe que les précédentes, à savoir :

- La scénarisation correspond à des tests d'ingénierie destinés à la conception d'IHM.
- Le cas de référence, sans filtrage, est comparé au cas à tester, doté d'un filtrage.
- Les sujets ne sont pas informés des actions logicielles. La logique des boutons, même si elle est décorrelée de leur visuel, est invisible.

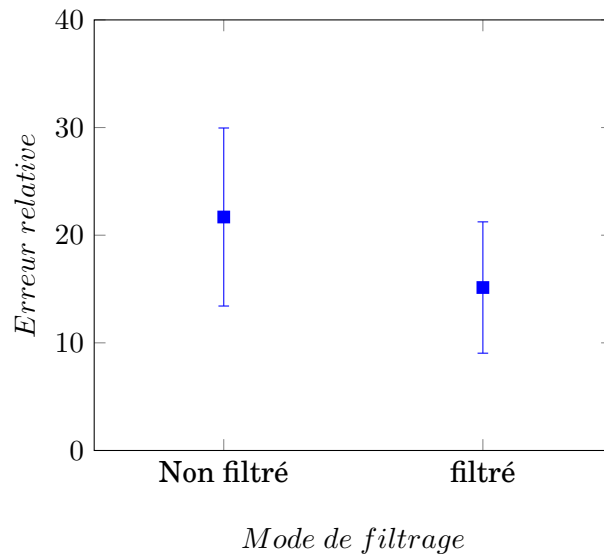


FIGURE 8.6 – Erreur relative moyenne des sujets, en % (de 0 à 50%).

8.2.1 Apparatus

Le protocole est presque identique à celui utilisé lors de la première expérimentation (voir section 6.3.1). Le CAVE P3I est à nouveau mis à l'honneur, et les sujets sont doté du même gant infrarouge pour la localisation de la main. Il y a cependant trois différences majeures.

- Seule la substitution sensorielle est étudiée et aucun dispositif supplémentaire (vitre transparente, tablette) n'est mis à contribution.
- Une échelle supplémentaire de boutons, plus petite que les deux échelles déjà présentes, est ajoutée (de même que pendant la seconde expérimentation, voir partie 7.3).
- Le système de substitution sensorielle est testé deux fois, avec et sans filtrage. Le logiciel a été modifié pour intégrer l'algorithme de filtrage par logique floue décrit plus haut. Les sujets ont donc 2 (avec et sans filtrage) fois 3 (tailles différentes des boutons) séries d'interactions.

Comme lors des études précédentes, il est demandé aux sujets d'interagir de manière régulière et en visant le centre des boutons. Ils ont quelques essais préliminaires pour comprendre le passage des boutons au vert, leur interaction et le retour des boutons au blanc.

8.2.2 Résultats

La répartition des données étant normale (vérifiée par un test de Shapiro-Wilk), l'exécution d'un test *t de Student pour données appariées* sur les chiffres représentés figure 8.6 révèle une p-value de 0.0004, c'est-à-dire des performances significativement différentes entre les systèmes filtrés et non filtrés. Les résultats sont concluants et en accord avec ce que prévoyait la resimulation. Les gains en erreur relative sont de l'ordre de 30% en moyenne et les 13 sujets ont, sans exception, obtenu de meilleurs résultats avec le filtrage.

Aucun sujet n'a eu de difficulté à interagir avec le filtrage, ce y compris lorsque les boutons étaient les plus petits, tandis que les boutons ont été plus souvent manqués sans filtrage.

Les sujets n'ont pas pour autant compris pourquoi leur performance était meilleure, et aucun n'a détecté la présence de l'algorithme.

8.2.3 Discussion

Dérive constante – En plus des bons résultats du système de filtrage qui s'est révélé performant et dont l'implémentation pourra être considérée plus sérieusement, cette étude est révélatrice des dérives de la perception spatiale dans les CAVEs. Si le filtre a fonctionné, et sachant qu'il a été bâti sur cette hypothèse, c'est que cette hypothèse est correcte.

Cette expérimentation montre donc que les sujets sont assez précis lorsqu'ils interagissent, mais manquent de finesse. S'ils ne touchent pas le bouton au bon endroit, ils touchent le plus souvent le bouton au même endroit, ou du moins avec une dérive plus lente. Les erreurs de perception spatiale induites par la vision peuvent être séparées en deux groupes.

- L'erreur constante, due à des disparités morphologiques, des défauts du système visuel ou du dispositif de localisation, corrigée rapidement par le filtre.
- L'erreur dynamique, due au manque d'indices de perceptions fiables dans l'environnement virtuel, qui fluctue au cours de la simulation, corrigée en continue par le filtre.

En trois dimensions – Si cette méthode de filtrage s'applique dans notre contexte de conception d'IHM, c'est-à-dire pour des objets localisés et bidimensionnels, elle est également généralisable en trois dimensions. Cependant, l'ajout de la variabilité de la profondeur nécessite une action supplémentaire de la part des utilisateurs pour déclencher l'interaction. L'appui sur un bouton ou le contact entre deux doigts sont des exemples d'actions de déclenchement qui peuvent permettre de réaliser un toucher en filtrant les trois dimensions de l'espace.

Localisation multiples – Dans cette étude, tous les boutons étaient assez proche et étaient donc touchés par la même dérive. C'est aussi pour cette raison que le filtre a pu fonctionner en gérant tous les boutons en même temps. Dès lors que des groupes de bouton sont trop éloignés, et surtout qu'ils sont vus d'un autre angle par l'utilisateur, ils doivent être chacun gérés indépendamment. Les filtres peuvent alors être paramétrés différemment et corrélés les uns avec les autres, suivant leur localisation.

8.3 Perspectives : système de calibration sans mesure de morphologie

Modifier le champ de collisions en fonction de la perception des utilisateurs, en deux ou trois dimensions, est une solution fonctionnelle qui améliore l'utilisabilité des moyens d'interaction. Cependant, il serait préférable de traiter le problème à plus bas niveau et de replacer directement l'œil virtuel au bon endroit.

Malheureusement, modifier l'emplacement de l'œil virtuel modifie l'image, il est donc impossible de le faire en temps réel et de corriger l'erreur dynamique des utilisateurs. Il reste toujours l'erreur statique.

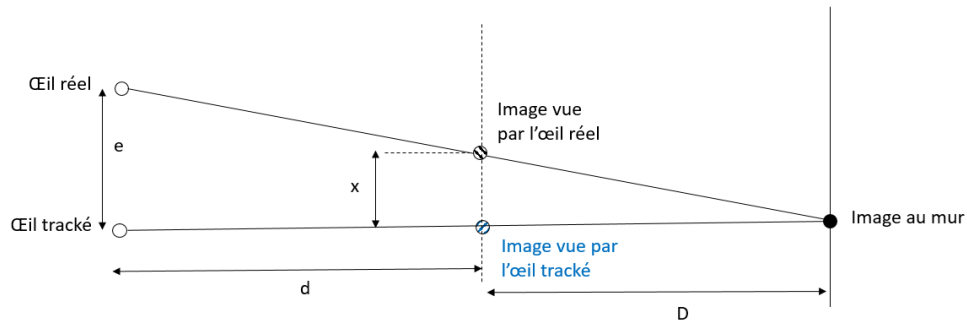


FIGURE 8.7 – Test et mesure de l’influence de la profondeur des yeux. *Ce test n’est valable que si l’IPD est connu et en vision droite pour minimiser l’influence de la profondeur des yeux.*

- $x = e * \frac{d}{d+D}$
- e la différence de hauteur entre l’œil réel et l’œil virtuel.
- D la distance entre l’objet virtuel et le mur.
- d la distance entre l’œil virtuel et l’objet virtuel.

Il est donc envisageable de concevoir un **système de mesure de la position du point œil** qui puisse fonctionner en quelques interactions, afin d’obtenir une synchronisation visuo-haptique plus précise, quitte à conserver une petite dose de filtrage en temps réel pour tenir compte des dérives dynamiques.

Ce système de mesure de la position de l’œil virtuel s’utiliserait au début de chaque simulation. Son objectif est d’effectuer une mesure de la position de l’œil virtuel plus précise que la position générique utilisée par les logiciels. Pour cela, l’algorithme doit jouer sur les 3 DDLs du système, à savoir la hauteur de l’œil virtuel, sa profondeur, et l’écartement entre les yeux. Les valeurs à fixer pour chaque paramètre sont identifiés après quelques interactions effectuées dans des conditions précises (vision directe, vision avec tel angle, etc.) qui permettent de deviner la somme des erreurs systémiques et morphologiques, avant de l’injecter dans le système de tracking pour que le visuel en tienne compte.

Le raisonnement ci-après décrit un exemple simple d’une calibration de ce type.

1. On commence par mesurer l’IPD de l’utilisateur. Le système d’équation n’a plus alors que deux inconnues, hauteur et profondeur des yeux, et est plus simple à résoudre. On peut également fixer l’IPD à une valeur moyenne et effectuer les autres étapes, mais une validation par expérimentation de cette simplification est nécessaire.
2. L’utilisateur a ensuite pour consigne de toucher le centre exact d’un objet en face de lui, en vision droite et centrée. On conseille de répéter cette opération plusieurs fois (3 fois pour l’exemple) pour robustifier les données.
3. La hauteur des yeux est donnée par l’équation $x = e * \frac{d}{d+D}$, dont les paramètres sont précisés dans la figure 8.7.
4. Ensuite, l’utilisateur effectue à nouveau 3 touchers, mais regardant l’objet depuis un angle de hauteur déterminé (voir figure 8.8).
5. On détermine cette fois la profondeur des yeux en fonction de la localisation du centre perçu de l’objet et de sa localisation théorique, sachant que la relation entre la différence de hauteur perçue de l’objet x et la différence de profondeur des yeux e suit

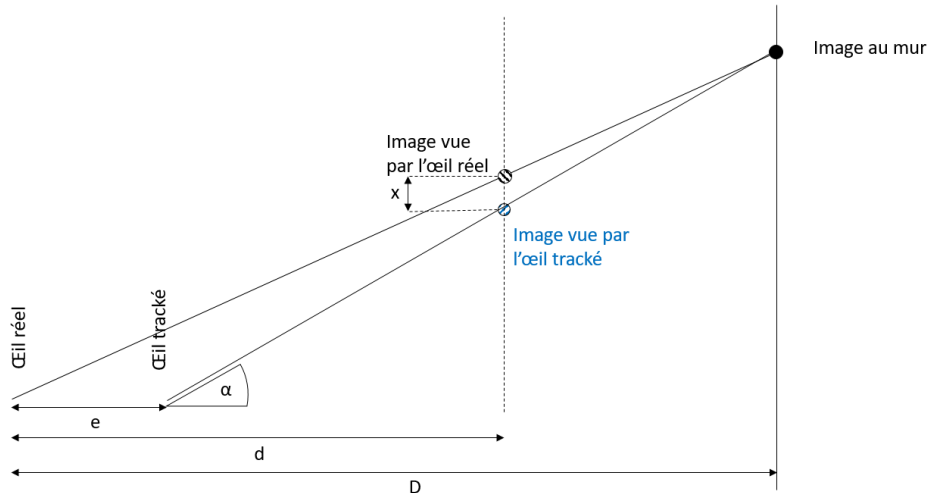


FIGURE 8.8 – Test et mesure de l’influence de la profondeur des yeux. Ce test n’est valable que si l’IPD et la hauteur des yeux sont connus.

- $x = \frac{(D-e-d)}{D-e} * \frac{2*e^2*a}{e^2+a^2-(\frac{D-e}{\cos\alpha})^2}$
- e la différence de profondeur entre l’œil réel et l’œil virtuel.
- D la distance entre l’œil réel et le mur.
- d la distance entre l’œil réel et l’objet virtuel.
- α l’angle entre l’œil virtuel et l’objet virtuel.
- $a = \sqrt{(\frac{D-e}{\cos\alpha})^2 + e^2 - 2 * \frac{D-e}{\cos\alpha} * e * \cos(180 - \alpha)}$.

l’équation $x = \frac{(D-e-d)}{D-e} * \frac{2*e^2*a}{e^2+a^2-(\frac{D-e}{\cos\alpha})^2}$, dont les paramètres sont identifiés sur la figure 8.8.

Ce type de protocole est une solution pratique et robuste s’il y a besoin d’interagir régulièrement et de façon fiable. Pour gérer les derniers cas de faillite du système, celui-ci doit pouvoir détecter lorsqu’un utilisateur ne parvient plus à interagir, au moyen de capteurs de mouvements et d’identification par exemple, ou plus simplement via une action de l’utilisateur. Ainsi, le système peut relancer la calibration sur demande ou si besoin.

Publications

Cette étude fait l’objet d’un article dans le journal *IEEE : Computer Graphics and Applications*. Accepté en mars 2018, l’article devrait être publié prochainement sous le titre *Evaluation of spatial filtering algorithms for visual interactions in CAVEs*. L’article tel qu’il a été accepté est joint en annexe 3. La méthode est également protégée par un brevet, intitulé *Système d’ajustement de localisation en environnement virtuel immersif*, dont les revendications sont détaillées en annexe 3.2.

CONCLUSION

Cette thèse s'est d'abord attachée à étudier les processus de perception mis en jeu lors d'interactions, en perspective avec les problématiques liées aux technologies virtuelles. Après avoir étudié chaque modalité, chaque système et technologie virtuelle ainsi que les synergies qui en ressortent, nous avons identifié et regroupé des cas d'usage, dans l'optique de dégager les grandes lignes de problématiques plus spécifiques. La suite de la thèse s'est focalisée sur l'un des cas d'usage identifiés, l'utilisation d'IHMs de véhicule, dans un CAVE, en interaction naturelle à la main. Ces études ont mis en évidence plusieurs problématiques, nouvelles ou déjà connues, abordées dans le manuscrit. Des expérimentations ont permis d'identifier plus précisément les causes de ces problématiques, d'en quantifier les influences, et de déterminer des moyens d'en minimiser les impacts. Enfin, les discussions qui en découlent décrivent quelques bonnes pratiques, les installations à éviter, et les meilleurs compromis à sélectionner.

L'importance et la variété des interactions dans les environnements virtuels

Les technologies virtuelles en plein développement se concentrent aujourd'hui beaucoup sur les modalités d'interaction. Dans les CAVEs, trop peu d'outils permettent d'interagir avec les environnements et de pousser le prototypage numérique au-delà de la simple visualisation. L'interactivité, par le lien bidirectionnel qui est créé entre l'environnement et l'utilisateur, permet à ce dernier d'accomplir de nouvelles tâches variées. Le sujet est vaste et les possibilités d'implémentations à étudier sont multiples, qu'elles soient haptiques, kinesthésiques ou cutanées, ou seulement visuelles, qu'elles soient réalistes, symboliques, ou seulement pratiques.

Des difficultés d'implémentations

Les outils d'interaction sont malheureusement souvent complexes voire impossibles à concevoir, choisir, implémenter. Le dispositif parfait n'existe pas encore et les systèmes actuels sont souvent des compromis entre modalité, précision, champs d'action, échelle d'effort, affordance, encombrement, prix, accessibilité, robustesse, compatibilité avec l'environnement, etc. Il devient nécessaire de choisir le dispositif d'interaction avec soin et en fonction du besoin, quand celui-ci n'est pas incompatible d'office.

De nombreuses sources de dégradation des performances des interactions

De basses performances sont aussi une raison majeure de la faible démocratisation des dispositifs d'interaction. Celles-ci sont principalement causées par le conflit de perception avec la vision. Dans les casques, le remplacement du corps par un avatar virtuel résout partiellement le problème, et les manettes d'interaction sont d'ailleurs devenues monnaie courante chez les principaux acteurs du marché. Les CAVEs et les interactions naturelles qu'ils permettent souffrent cependant beaucoup des imprécisions du visuel, car il est souvent difficile d'intégrer spatialement des objets physiques dans le monde virtuel.

Causes et importance relative

Les imprécisions visuelles ont de nombreuses sources, plus ou moins étudiées et quantifiées. La localisation imprécise des yeux de l'utilisateur est une cause parfaitement identifiée dont l'effet est majeur, agissant par les 3 degrés de liberté que sont la hauteur, la profondeur, et l'écart inter-pupillaire. Ce défaut, statique et spécifique à chaque sujet, fausse la perception de la profondeur, mais aussi le positionnement latéral des objets et les échelles. Il existe aussi des causes plus qualitatives, comme le conflit d'accommodation et de vergence responsable d'une mauvaise perception de la profondeur, ou encore la faible robustesse de la perception responsable de fluctuations de la perception spatiale au cours du temps.

Maximiser les performances et l'utilisabilité

L'étude de ces incertitudes permet de les éviter au mieux, moyennant certaines bonnes pratiques. Nous ne pouvons qu'insister sur l'importance de la scénarisation, une des conclusions de la seconde étude de cette thèse. Une scénarisation intelligente permet de diriger la concentration des utilisateurs là où elle est nécessaire et de significativement améliorer les performances de ses interactions. Un choix pertinent de modalités d'interaction est également requis, en tenant compte des spécificités de chaque modalité, de sa compatibilité avec le système visuel et du besoin exprimé pour le cas d'usage concerné. Les environnements statiques, moins scénarisés, ou les performances sont les plus basses, nécessitent par exemple des modalités plus performantes. Enfin, il est possible d'améliorer considérablement l'utilisabilité par des méthodes logicielles, de prédiction et de filtrage, et notamment par des calibrations subjectives.

LISTE DES FIGURES

1.1	Le robot lobbybot utilisé avec un HTC Vive	16
2.1	La boucle Action-Perception-Sensation, centrée sur l’haptique.	22
2.2	Les mécano-récepteurs présents dans la peau	25
2.3	La division de l’interaction entre la main et son avatar	29
2.4	Illusion visuelle classique d’échelle et de profondeur	31
2.5	Deux situations à variance visuelle différente	32
2.6	Le processus de compilation des perceptions par le cerveau	33
2.7	Deux domaines d’expertise des simulations chez Renault	35
2.8	Les facteurs de variation de la présence	39
2.9	La boucle d’interaction de l’haptique.	39
2.10	Schéma simplifié des effets des latences sur les performances et la présence	44
3.1	Les effets de la parallaxe	48
3.2	Le CAVE IRIS de Renault	49
3.3	Le HTC Vive et ses différents périphériques	51
3.4	Avatars de la main, localisés par un LeapMotion©.	54
3.5	Les temps de perceptions des yeux pour un CAVE mono ou bi-point de vue	58
4.1	Le gant CyberGlove doté du système CyberTouch.	63
4.2	Quelques exemples de formes d’ondes	64
4.3	Un système <i>AIREAL</i> de Disney Research [Sodhi <i>et al.</i> , 2013]	68
4.4	Le kit d’évaluation <i>UltraHaptics</i>	69
4.5	Courbe caractéristique qualitative des efforts possibles à exercer par un système kinesthésique	71
4.6	Le PHANTOM Omni de SensAble Technology, inc et le Virtuose 6D de Haption	71
4.7	Le MANDARIN et le Dexmo	72
4.8	Le fonctionnement à double sens des systèmes à fil tendus	75
4.9	Différents systèmes à fils tendus	75
4.10	Le champ de tracking du GameTrak en espace normalisé	76
4.11	Une plaque transparente interposée liée à un bras Ergotron©LX	79
4.12	La réfraction sur un objet plan	80
4.13	L’interface <i>TouchMover</i> de Microsoft	81
4.14	Deux dispositifs de tracking optique, avec et sans marqueurs	83

5.1	L'influence d'un défaut d'écart inter-pupillaire sur la profondeur visuelle . . .	88
5.2	L'influence de la vergence sur l'écart inter-pupillaire dynamique	89
5.3	L'influence de la profondeur des yeux	89
5.4	L'influence de la hauteur des yeux	90
6.1	Le CAVE P3I, et la scène virtuelle qui y est affichée	95
6.2	Le logiciel utilisé lors de l'expérimentation	96
6.3	La vitre passive utilisée en phase Y et le gant A.R.T. Fingertracking	96
6.4	La calibration effectuée pour le moteur d'interactions	98
6.5	Déroulement des séries	99
6.6	Temps d'exécution moyen de chaque sujet pour l'expérimentation 1	101
6.7	Écart-type des erreurs relatives pour chaque sujet.	102
6.8	Le sentiment d'être compétent des sujets, entre les phases X et Y.	104
7.1	Un sujet en pleine simulation, conduisant avec le volant et les pédales pendant qu'il interagit	109
7.2	Les trois différentes échelles utilisées en contexte	109
7.3	Temps d'exécution moyen des sujets	111
7.4	Erreur relative moyenne	112
7.5	Variances moyennes des erreurs relatives.	112
7.6	La question <i>Avez-vous trouvé que cette interface est utilisable convenablement ?</i> notée de 1 à 7 pour chaque modalité.	113
8.1	Séparation d'un bouton virtuel en un visuel et une logique	118
8.2	Le logiciel de resimulation utilisé pour la conception et l'optimisation des algorithmes de filtrages	119
8.3	Processus d'application de logique floue	121
8.4	Les fonctions d'appartenance aux sous-ensembles flous	123
8.5	Le nuage de points des interactions des sujets, avant et après filtrage	124
8.6	Erreur relative moyenne des sujets, en % (de 0 à 50%).	125
8.7	Test et mesure de l'influence de la profondeur des yeux	127
8.8	Exemple de mesure de l'influence de la hauteur des yeux	128

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Techniques haptiques suivant le niveau d'exigence	10
2.1	Les mécano-récepteurs des zones glabres de la peau	25
2.2	Les différents facteurs du questionnaire de Witmer & Singer revisité [Witmer & Singer, 1998]	38
3.1	Tableau comparatif des solutions d'affichage CAVE et HMD	53
4.1	Pros et cons des gants vibrotactiles	66
4.2	Pros et cons des dispositifs d'haptique sans contact	70
4.3	Spécifications techniques du Virtuose 6D d'Haption	74
4.4	Pros et cons des bras haptiques et des exosquelettes	74
4.5	Pros et cons des systèmes à fils tendus.	77
4.6	Pros et cons des systèmes d'haptique passive	81
4.7	Comparatif simplifié des différentes technologies d'haptique	84
5.1	Différentes sources de défaut de perception des distances	87

LISTES DES CITATIONS

1	« One of the most disconcertingly unnatural properties of most virtual environments (VEs) is the ability of the user to pass through objects. » [Insko, 2001]	1
2	« Observers can recalibrate their visual percepts when visual and haptic (touch) cues are discordant and the haptic information is judged to be reliable. » [Atkins <i>et al.</i> , 2003]	33
3	« La fidélité psychologique n’a pas de lien direct et simple avec les autres niveaux de fidélité. » [Burkhardt <i>et al.</i> , 2003]	41
4	« Tactile cues, such as those conveyed via vibrations or varying pressures, are effective as simple alerts. Kinesthetic devices are advantageous when tasks involve hand–eye coordination (for example, object manipulation), in which haptic sensing and feedback are key to performance. » [Hale & Stanney, 2004]	42
5	« Le délai écoulé entre l’action du conducteur et le résultat dans la restitution de stimuli perceptuels introduit des malaises (mal de simulateur) s’il est trop différent de ce qui est ressenti. » [Kemeny, 1999]	43
6	« Depth constancy is considerably less than perfect, perceived shape is distorted and absolute distance is misestimated. » Hibbard & Bradshaw [2003]	45
7	« It is possible that relatively simple haptic feedback when combined with high-quality visual images, which have become very inexpensive to produce, could create a similar sense of contact produced by more expensive haptic displays alone. » [Lindeman <i>et al.</i> , 2002]	46
8	« The human needs some type of representational vehicle to embody his or her being in virtual reality. » Bailenson & Blascovich [2004]	53
9	« As in the days when people were astonished to see their first wire-frame computer-generated images, people are now astonished to feel their first virtual object. » Salisbury <i>et al.</i> [2004]	60
10	« The limitations of haptic devices in their capacity to provide the range and bandwidth of forces necessary to match the perceptual capabilities of the human haptic system have led to the exploration of multisensory displays as a means of compensating for haptic device limitations. » [Lederman & Jones, 2011]	61
11	« A crucial issue in the realism of manipulation of objects in Virtual Reality applications is the achievement of colocated representations. » Antonya <i>et al.</i> [2007]	86

BIBLIOGRAPHIE

- Abate, Andrea F., Guida, Mariano, Leoncini, Paolo, Nappi, Michele, & Ricciardi, Stefano. 2009. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry. *Journal of Visual Languages & Computing*, **20**(5), 318–325.
- Adam, J. J. 1999. Gender differences in choice reaction time : evidence for differential strategies. *Ergonomics*, **42**(2), 327–335.
- Adams, R.J., & Hannaford, B. 1999. Stable haptic interaction with virtual environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **15**(3), 465–474.
- Alhalabi, M.Osama, Horiguchi, Susumu, & Kunifuji, Susumu. 2003. An experimental study on the effects of Network delay in Cooperative Shared Haptic Virtual Environment. *Computers & Graphics*, **27**(2), 205–213.
- Antonya, Cs, Butnaru, T, & Talaba, D. 2007. Haptic interaction with virtual mechanical systems.
- Aström, Karl Johan, & Hägglund, Tore. 1995. *PID controllers : theory, design, and tuning*. Vol. 2. Isa Research Triangle Park, NC.
- Atkins, Joseph E., Fiser, József, & Jacobs, Robert A. 2001. Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, **41**(4), 449–461.
- Atkins, Joseph E, Jacobs, Robert A, & Knill, David C. 2003. Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, **43**(25), 2603–2613.
- Bailenson, Jeremy N, & Blascovich, Jim. 2004. Avatars. *In : Encyclopedia of Human-Computer Interaction, Berkshire Publishing Group*. Citeseer.
- Bailenson, Jeremy N., Beall, Andrew C., Loomis, Jack, Blascovich, Jim, & Turk, Matthew. 2004. Transformed Social Interaction : Decoupling Representation from Behavior and Form in Collaborative Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **13**(4), 428–441.
- Baitech, Larry, & Smith, Randall C. 2000. Physiological Correlates of Spatial Perceptual Discordance in a Virtual Environment.

- Basdogan, Cagatay, & Srinivasan, Mandayam A. 2002. Haptic rendering in virtual environments. *Handbook of virtual environments*, 117–134.
- Bayart, Benjamin. 2007. *Réalité augmentée haptique : théorie et applications*. Ph.D. thesis. Thèse de doctorat dirigée par Kheddar, Abderrahmane Robotique Evry-Val d'Essonne 2007 2007EVRY0035.
- Beall, Andrew C., Loomis, Jack M., Philbeck, John W., & Fikes, Thomas G. 1995 (Apr.). Absolute motion parallax weakly determines visual scale in real and virtual environments.
- Biocca, Frank, Kim, Jin, & Choi, Yung. 2001. Visual Touch in Virtual Environments : An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **10**(3), 247–265.
- Botvinick, Matthew, Cohen, Jonathan, & others. 1998. Rubber hands' feel'touch that eyes see. *Nature*, **391**(6669), 756–756.
- Brooks, Frederick P. 1999. What's real about virtual reality? *IEEE Computer graphics and applications*, **19**(6), 16–27.
- Brown, L, & Kaye, JJ. 2007. Eggs-ploring the influence of material properties on haptic experience. *HAID'07*.
- Buoguila, Laroussi, Cai, Yi, & Sato, Makoto. 1997. New haptic device for human scale virtual environment Scaleable-SPIDAR. *Pages 93–98 of : ICAT*, vol. 97.
- Burdea, Grigore. 1996. *Force and touch feedback for Virtual Reality*. New York : Wiley.
- Burdea, Grigore, & Coiffet, P. 1993. *La Réalité Virtuelle*.
- Burge, J., Girshick, A. R., & Banks, M. S. 2010. Visual-Haptic Adaptation Is Determined by Relative Reliability. *Journal of Neuroscience*, **30**(22), 7714–7721.
- Burkhardt, Jean-Marie, Bardy, Benoit, & Lourdeaux, D. 2003. Immersion, Réalisme et Présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels.
- Carlin, Albert S., Hoffman, Hunter G., & Weghorst, Suzanne. 1997. Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia : a case report. *Behaviour Research and Therapy*, **35**(2), 153–158.
- Carter, Tom, Seah, Sue Ann, Long, Benjamin, Drinkwater, Bruce, & Subramanian, Sriram. 2013. UltraHaptics : multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. ACM Press.
- Chan, Li-Wei, Kao, Hui-Shan, Chen, Mike Y., Lee, Ming-Sui, Hsu, Jane, & Hung, Yi-Ping. 2010. Touching the void : direct-touch interaction for intangible displays. ACM Press.
- Chen, Karen B., Kimmel, Ryan A., Bartholomew, Aaron, Ponto, Kevin, Gleicher, Michael L., & Radwin, Robert G. 2014. Manually locating physical and virtual reality objects. *Human Factors*, **56**(6), 1163–1176.
- Collins, D. F. 2005. Cutaneous Receptors Contribute to Kinesthesia at the Index Finger, Elbow, and Knee. *Journal of Neurophysiology*, **94**(3), 1699–1706.
- Combe, Emmanuelle, Posselt, Javier, & Kemeny, Andras. 2008. Virtual prototype visualization : a size perception study. ACM Press.

Bibliographie

- Craske, Brian, & Crawshaw, Martin. 1975. Shifts in kinesthesia through time and after active and passive movements. *Perceptual and Motor Skills*, **40**(3), 755–761.
- Cruz-Neira, Carolina, Sandin, Daniel, Defanti, Thomas, Kenyon, Robert V, & Hart, John C. 1993. The CAVE : audio visual experience automatic virtual environment. *Communications of the ACM*, **35**(6), 64–72.
- Cutting, James E., & Vishton, Peter M. 1995. Perceiving Layout and Knowing Distances. *Pages 69–117 of : Perception of Space and Motion*. Elsevier.
- Dodgson, Neil A. 2004 (May). Variation and extrema of human interpupillary distance.
- El Saddik. 2007. The Potential of Haptics Technologies. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, **10**(1), 10–17.
- Ernst, Marc O., & Banks, Martin S. 2002. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, **415**(6870), 429–433.
- Ernst, Marc O., & Bühlhoff, Heinrich H. 2004. Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, **8**(4), 162–169.
- Ernst, Marc O, Banks, Martin S, & Bühlhoff, Heinrich H. 2000. Touch can change visual slant perception. *Nature neuroscience*, **3**(1), 69–73.
- Fitts, Paul M. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, **47**(6), 381–391.
- Fuentes, C. T., & Bastian, A. J. 2010. Where Is Your Arm? Variations in Proprioception Across Space and Tasks. *Journal of Neurophysiology*, **103**(1), 164–171.
- Galambos, Péter. 2012. Vibrotactile feedback for haptics and telemanipulation : Survey, concept and experiment. *Acta Polytechnica Hungarica*, **9**(1), 41–65.
- Gaudiosi, J. 2017. *Tactai gets in touch with Ericsson for AR and VR 'dynamic tactile wave'tech*.
- Gibson, James Jerome. 2014. *Approche écologique de la perception visuelle*. Éd. Dehors.
- Goodale, Melvyn A., & Milner, A. David. 1992. Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, **15**(1), 20–25.
- Gu, Xiaochi, Zhang, Yifei, Sun, Weize, Bian, Yuanzhe, Zhou, Dao, & Kristensson, Per Ola. 2016. Dexmo : An Inexpensive and Lightweight Mechanical Exoskeleton for Motion Capture and Force Feedback in VR. *Pages 1991–1995 of : Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM.
- Gunn, Chris, Hutchins, Matthew, & Adcock, Matt. 2005. Combating Latency in Haptic Collaborative Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **14**(3), 313–328.
- Gupta, Sidhant, Morris, Dan, Patel, Shwetak N, & Tan, Desney. 2013. AirWave : Non-Contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings.
- Hale, K.S., & Stanney, K.M. 2004. Haptic rendering - beyond visual computing - Deriving haptic design guidelines from human physiological, psychophysical, and neurological foundations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **24**(2), 33–39.

- Hannaford, Blake, & Wood, Laurie. 1989. Performance evaluation of a 6 axis high fidelity generalized force reflecting teleoperator.
- Hibbard, Paul B, & Bradshaw, Mark F. 2003. Reaching for virtual objects : binocular disparity and the control of prehension. *Experimental Brain Research*, **148**(2), 196–201.
- Hill, M. 2014. *Self adapting haptic device*. Google Patents. US Patent 8,860,562.
- Hoffman, H.G. 1998. Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments. IEEE Comput. Soc.
- Hoshi, Takayuki, Takahashi, Masafumi, Iwamoto, Takayuki, & Shinoda, Hiroyuki. 2010. Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, **3**(3), 155–165.
- Hu, Helen H, Gooch, Amy A, Thompson, William B, Smits, Brian E, Rieser, John J, & Shirley, Peter. 2000. Visual cues for imminent object contact in realistic virtual environment. Pages 179–185 of : *Proceedings of the conference on Visualization'00*. IEEE Computer Society Press.
- Insko, Brent Edward. 2001. *Passive haptics significantly enhances virtual environments*. Ph.D. thesis, University of North Carolina at Chapel Hill.
- Interrante, V., Ries, B., & Anderson, L. 2006. Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited. IEEE.
- Iwamoto, Takayuki, & Shinoda, Hiroyuki. 2008. Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound. Pages 504–513 of : *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*, vol. 5024. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
- Jay, Caroline, Glencross, Mashhuda, & Hubbold, Roger. 2007. Modeling the effects of delayed haptic and visual feedback in a collaborative virtual environment. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, **14**(2), 8–es.
- Jex, H. 1988. Four critical tests for control-feel simulators. In : *23rd Annual Conference on Manual Control*.
- Johansson, Roland S. 1978. Tactile sensibility in the human hand : receptive field characteristics of mechanoreceptive units in the glabrous skin area. *The Journal of physiology*, **281**, 101.
- Kalman, Rudolph Emil, & others. 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, **82**(1), 35–45.
- Kemeny, Andras. 1993. A cooperative driving simulator. Pages 67–71 of : *Proceedings of the International Training Equipment Conference (ITEC)*.
- Kemeny, Andras. 1999. Simulation and perception. In : *Introduction de la Conférence sur la Simulation de Conduite*.
- Kemeny, Andras. 2009. Driving simulation for virtual testing and perception studies. Pages 15–23 of : *Proceedings of DSC Europe Conference, Monte-Carlo*.
- Kemeny, Andras. 2014. From driving simulation to Virtual Reality. Page 32 of : *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*. ACM.

- Kennedy, Robert S., Lane, Norman E., Berbaum, Kevin S., & Lilienthal, Michael G. 1993. Simulator Sickness Questionnaire : An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, **3**(3), 203–220.
- Kenyon, Robert V, Sandin, Daniel, Smith, Randall C, Pawlicki, Richard, & Defanti, Thomas. 2007. Size-Constancy in the CAVE. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **16**(2), 172–187.
- Kenyon, Robert V, Phenany, Moses, Sandin, Daniel, & Defanti, Thomas. 2008. Accommodation and size-constancy of virtual objects. *Annals of biomedical engineering*, **36**(2), 342–348.
- Kheddar, A, Drif, A, Citérin, J, & Le Mercier, B. 2004. A multi-level haptic rendering concept. *EuroHaptics, Munich, Herbert Hieronymus*, 147–154.
- Kildal, Johan. 2010. 3D-press : haptic illusion of compliance when pressing on a rigid surface. *Page 21 of : International Conference on Multimodal Interfaces and the Workshop on Machine Learning for Multimodal Interaction*. ACM.
- Kim, Sunjun, & Lee, Geehyuk. 2013. Haptic feedback design for a virtual button along force-displacement curves. ACM Press.
- Kitagawa, Masaya, Dokko, Daniell, Okamura, Allison M, Bethea, Brian T, & Yuh, David D. 2004. Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for surgical teleoperation. *Studies in health technology and informatics*, 157–163.
- Knapp, Joshua M., & Loomis, Jack M. 2004. Limited Field of View of Head-Mounted Displays Is Not the Cause of Distance Underestimation in Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **13**(5), 572–577.
- Kuchenbecker, K.J., Fiene, J., & Niemeyer, G. 2006. Improving contact realism through event-based haptic feedback. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **12**(2), 219–230.
- Lassagne, Antoine, Kemeny, Andras, Posselt, Javier, & Merienne, Frederick. 2017a (Sept.). Comparing Tangible and Fully Virtual Haptic Systems for HMI Studies in Simulated Driving Situations.
- Lassagne, Antoine, Kemeny, Andras, Posselt, Javier, & Merienne, Frederic. 2017b. Performance evaluation of passive haptic feedback for tactile HMI design in CAVEs. *IEEE Transactions on Haptics*, 1–1.
- Lecuyer, A, Andriot, C, & Crosnier, André. 2003. Interfaces haptiques et pseudo-haptiques. *Proceedings of JNRR*, **3**.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. 2009. Haptic perception : A tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics*, **71**(7), 1439–1459.
- Lederman, Susan J., & Jones, Lynette A. 2011. Tactile and Haptic Illusions. *IEEE Transactions on Haptics*, **4**(4), 273–294.
- Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T., & Blanke, O. 2007. Video Ergo Sum : Manipulating Bodily Self-Consciousness. *Science*, **317**(5841), 1096–1099.

- Lindeman, R. W., Templeman, J. N., Sibert, J. L., & Cutler, J. R. 2002. Handling of Virtual Contact in Immersive Virtual Environments : Beyond Visuals. *Virtual Reality*, **6**(3), 130–139.
- Lindeman, Robert W., Yanagida, Yasuyuki, Noma, Haruo, & Hosaka, Kenichi. 2006. Wearable vibrotactile systems for virtual contact and information display. *Virtual Reality*, **9**(2-3), 203–213.
- Lindemann, Randel, & Tesar, Delbert. 1989. Construction and demonstration of a 9-string 6 DOF force reflecting joystick for telerobotics.
- Lohse, Keith R, Sherwood, David E, & Healy, Alice F. 2010. How changing the focus of attention affects performance, kinematics, and electromyography in dart throwing. *Human Movement Science*, **29**(4), 542–555.
- Lok, Benjamin, Naik, Samir, Whitton, Mary, & Brooks, Frederick P. 2003. Effects of Handling Real Objects and Self-Avatar Fidelity on Cognitive Task Performance and Sense of Presence in Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **12**(6), 615–628.
- Loomis, Jack M, Silva, José A Da, Philbeck, John W, & Fukusima, Sergio S. 1996. Visual perception of location and distance. *Current Directions in Psychological Science*, **5**(3), 72–77.
- Madison, Cindee, Thompson, William, Kersten, Daniel, Shirley, Peter, & Smits, Brian. 2001. Use of interreflection and shadow for surface contact. *Perception & Psychophysics*, **63**(2), 187–194.
- Martinez, Jonatan, Garcia, Arturo, Oliver, Miguel, Molina, Jose Pascual, & Gonzalez, Pascual. 2016. Identifying Virtual 3D Geometric Shapes with a Vibrotactile Glove. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **36**(1), 42–51.
- Mavor, Anne S, Durlach, Nathaniel I, & others. 1994. *Virtual Reality : : Scientific and Technological Challenges*. National Academies Press.
- Mike Sinclair, Michel Pahud, Hrvoje Benko. 2013. *TouchMover : Actuated 3D Touchscreen with Haptic Feedback*. ACM – Association for Computing Machinery.
- Mima, T. 1999. Brain structures related to active and passive finger movements in man. *Brain*, **122**(10), 1989–1997.
- Minamizawa, Kouta, Fukamachi, Souichiro, Kajimoto, Hiroyuki, Kawakami, Naoki, & Tachi, Susumu. 2007. Gravity grabber : wearable haptic display to present virtual mass sensation.
- Mohler, Betty J, Creem-Regehr, Sarah H, Thompson, William B, & Bühlhoff, Heinrich H. 2010. The Effect of Viewing a Self-Avatar on Distance Judgments in an HMD-Based Virtual Environment. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **19**(3), 230–242.
- Monnai, Yasuaki, Hasegawa, Keisuke, Fujiwara, Masahiro, Yoshino, Kazuma, Inoue, Seki, & Shinoda, Hiroyuki. 2014. HaptoMime : mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. ACM Press.
- Moore, Keith L, Dalley, Arthur F, & Agur, Anne MR. 2013. *Clinically oriented anatomy*. Lippincott Williams & Wilkins.

Bibliographie

- Mori, Masahiro, MacDorman, Karl, & Kageki, Norri. 2012. The Uncanny Valley [From the Field]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **19**(2), 98–100.
- Murray, Anne M., Klatzky, Roberta L., & Khosla, Pradeep K. 2003. Psychophysical Characterization and Testbed Validation of a Wearable Vibrotactile Glove for Telemanipulation. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **12**(2), 156–182.
- Nunez, Oscar Javier Ariza, Lubos, Paul, & Steinicke, Frank. 2015. HapRing : A Wearable Haptic Device for 3D Interaction.
- Okamura, A.M., Dennerlein, J.T., & Howe, R.D. 1998. Vibration feedback models for virtual environments. vol. 1. IEEE.
- Okamura, A.M., Cutkosky, M.R., & Dennerlein, J.T. 2001. Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **6**(3), 245–252.
- Pavani, Francesco, Spence, Charles, & Driver, Jon. 2000. Visual capture of touch : Out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological science*, **11**(5), 353–359.
- Perroud, Benoit, Régnier, Stéphane, Kemeny, Andras, & Mérienne, Frédéric. 2017. Model of realism score for immersive VR systems. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*.
- Petzold, Bernd, Zaeh, Michael F, Faerber, Berthold, Deml, Barbara, Egermeier, Hans, Schilp, Johannes, & Clarke, Stella. 2004. A study on visual, auditory, and haptic feedback for assembly tasks. *Presence : teleoperators and virtual environments*, **13**(1), 16–21.
- Provins, KA, & Morton, Rosemary. 1960. Tactile discrimination and skin temperature. *Journal of applied physiology*, **15**(1), 155–160.
- Raisamo, Jukka. 2009. Tactile Sensing & Feedback. *pervasive. jku. at*, 1–62.
- Rank, Markus, Shi, Zhuanghua, & Hirche, Sandra. 2010. Perception of Delay in Haptic Telepresence Systems. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **19**(5), 389–399.
- Richard, P., & Coiffet, P. 1995. Human perceptual issues in virtual environments : sensory substitution and information redundancy. IEEE.
- Richardson, Adam R, & Waller, David. 2007. Interaction with an immersive virtual environment corrects users' distance estimates. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, **49**(3), 507–517.
- Robillard, G, Bouchard, S, Renaud, P, & Cournoyer, L.G. 2002. Validation canadienne-française de deux mesures importantes en réalité virtuelle : l'Immersive Tendencies Questionnaire et le Presence Questionnaire. *25 ième congrès de la Société Québécoise pour la Recherche en Psychologie (SQRP)*, Nov.
- Robles-De-La-Torre, G. 2006. The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments. *IEEE Multimedia*, **13**(3), 24–30.
- Salisbury, K., Brock, D., Massie, T., Swarup, N., & Zilles, C. 1995. Haptic rendering : programming touch interaction with virtual objects. ACM Press.
- Salisbury, K., Conti, F., & Barbagli, F. 2004. Survey - Haptic rendering : introductory concepts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **24**(2), 24–32.

- Sato, Makoto. 1991. Space Interface Device for Artificial Reality-SPIDAR. *The Transactions of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, **74**(7), 887–894.
- Scheibe, Robert, Moehring, Mathias, & Froehlich, Bernd. 2007. Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments. IEEE.
- Seow, K. 1988. Physiology of touch, grip, and gait. *Tactile sensors for robotics and medicine*. Wiley, New York, 13–40.
- Short, Fay, & Ward, Robert. 2009. Virtual limbs and body space : Critical features for the distinction between body space and near-body space. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **35**(4), 1092–1103.
- Slater, Mel. 2004. How Colorful Was Your Day? Why Questionnaires Cannot Assess Presence in Virtual Environments. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **13**(4), 484–493.
- Slater, Mel, Sadagic, Amela, Usoh, Martin, & Schroeder, Ralph. 2000. Small-Group Behavior in a Virtual and Real Environment : A Comparative Study. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **9**(1), 37–51.
- Sodhi, Rajinder, Poupyrev, Ivan, Glisson, Matthew, & Israr, Ali. 2013. AIREAL : interactive tactile experiences in free air. *ACM Transactions on Graphics*, **32**(4), 1.
- Soichiando, A, Noriytjki Kid, & Oda, Shingo. 2001. Central and peripheral visual reaction time of soccer players and athletes. *Perceptual and Motor Skills*, **92**(3), 786–794.
- Sreng, J., Lecuyer, A., Megard, C., & Andriot, C. 2006. Using Visual Cues of Contact to Improve Interactive Manipulation of Virtual Objects in Industrial Assembly/Maintenance Simulations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **12**(5), 1013–1020.
- Sreng, J., Lecuyer, A., Andriot, C., & Arnaldi, B. 2009. Spatialized Haptic Rendering : Providing Impact Position Information in 6DOF Haptic Simulations Using Vibrations. IEEE.
- Stein, Barry E, Wallace, Mark T, & Meredith, M Alex. 1995. Neural mechanisms mediating attention and orientation to multisensory cues.
- Steuer, Jonathan. 1992. Defining virtual reality : Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, **42**(4), 73–93.
- Strasburger, H., Rentschler, I., & Juttner, M. 2011. Peripheral vision and pattern recognition : A review. *Journal of Vision*, **11**(5), 13–13.
- Sutcliffe, Alistair, Gault, Brian, Fernando, Terence, & Tan, Kevin. 2006. Investigating interaction in CAVE virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, **13**(2), 235–267.
- Suzuki, Y., & Kobayashi, M. 2005. Air jet driven force feedback in virtual reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **25**(1), 44–47.
- Tan, Hong Z, Srinivasan, Mandayam A, Eberman, Brian, & Cheng, Belinda. 1994. Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces. *Dynamic Systems and Control*, **55**(1), 353–359.

- Terziman, L., Marchal, M., Multon, F., Arnaldi, B., & Lecuyer, A. 2012. The King-Kong Effects : Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step. IEEE.
- Thompson, William B., Willemsen, Peter, Gooch, Amy A., Creem-Regehr, Sarah H., Loomis, Jack M., & Beall, Andrew C. 2004. Does the Quality of the Computer Graphics Matter when Judging Distances in Visually Immersive Environments? *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **13**(5), 560–571.
- Toshima, Motonori, Akahane, Katsuhito, & Sato, Makoto. 2015. SPIDAR-S : Haptic Device Attached to the Smartphone. *Pages 127–129 of* : Kajimoto, Hiroyuki, Ando, Hideyuki, & Kyung, Ki-Uk (eds), *Haptic Interaction*, vol. 277. Tokyo : Springer Japan.
- Tremblay, M.R., & Yim, M.H. 2000 (July). *Tactile feedback man-machine interface device*. US Patent 6,088,017.
- Tsalamlal, Mohamed Yassine, Issartel, Paul, Ouarti, Nizar, & Ammi, Mehdi. 2014. HAIR : Haptic feedback with a mobile AIR jet. IEEE.
- Usoh, Martin, Arthur, Kevin, Whitton, Mary C., Bastos, Rui, Steed, Anthony, Slater, Mel, & Brooks, Frederick P. 1999. Walking & walking-in-place & flying, in virtual environments. ACM Press.
- Usoh, Martin, Catena, Ernest, Arman, Sima, & Slater, Mel. 2000. Using presence questionnaires in reality. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **9**(5), 497–503.
- van Beers, Robert J, Sittig, Anne C, & van Der Gon, Jan J Denier. 1999. Integration of proprioceptive and visual position-information : An experimentally supported model. *Journal of neurophysiology*, **81**(3), 1355–1364.
- Vigliensoni, Gabriel, & Wanderley, Marcelo M. 2012. A Quantitative Comparison of Position Trackers for the Development of a Touch-less Musical Interface. *In* : *NIME*.
- Vogels, Ingrid M. L. C. 2004. Detection of Temporal Delays in Visual-Haptic Interfaces. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, **46**(1), 118–134.
- Wang, D., Tuer, K., Rossi, M., Ni, L., & Shu, J. 2003. The effect of time delays on tele-haptics. IEEE.
- Wang, Feng, & Ren, Xiangshi. 2009. Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction. ACM Press.
- Wann, John P., Rushton, Simon, & Mon-Williams, Mark. 1995. Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, **35**(19), 2731–2736.
- Weiss, Malte, Wacharamanotham, Chat, Voelker, Simon, & Borchers, Jan. 2011. FingerFlux : Near-surface Haptic Feedback on Tabletops.
- Wellman, Parris, & Howe, Robert D. 1995. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. *Proc. ASME DSCD, DSC*, **57**(2), 713–718.
- Witmer, Bob G., & Singer, Michael J. 1998. Measuring Presence in Virtual Environments : A Presence Questionnaire. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, **7**(3), 225–240.

- Wright, W Geoffrey, Creem-Regehr, Sarah H, Warren, William H, Anson, Eric R, Jeka, John, & Keshner, Emily A. 2014. Sensorimotor recalibration in virtual environments. *Pages 71–94 of : Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation*. Springer.
- Xu, Song, Perez, Manuela, Yang, Kun, Perrenot, Cyril, Felblinger, Jacques, & Hubert, Jacques. 2014. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator. *Surgical Endoscopy*, **28**(9), 2569–2576.

INDEX

- Écart inter-pupillaire, 6, 87
- Accélération digitale, 3
- Accommodation, 90
- Acquisition de données, 40
- Actuateurs, 72
- Admittance, 60
- Affordances, 34, 35
- Antialiasing, 47
- Apprentissage, 28
- Approche visuelle, 86
- Atteignabilités, 14
- Augmentation tactile, 77
- Avatar, 53
- Bras haptiques, 70
- Calibration subjective, 79, 97
- CAVE, 47–50, 53
- Charge cognitive, 34
- Cinétose, 43
- Coût des simulateurs, 61
- Collaboratif, 58
- Colocalisation, 77, 91
- Colorimétrie, 47
- Conflit accommodation/vergence, 90
- Conflit visuo-vestibulaire, 43
- Contact dur, 70
- Contraste, 46
- Coopératif, 58
- Cutané, 62
- Détection des collisions, 40
- Design, 10
- Exosquelette, 72
- Filtrage, 119
- Follicule pileux, 24
- Formation, 11
- Fréquence d'image, 46
- Haptique passive, 77–79, 93
- Haptique sans contact, 67–70
- Hauteur des yeux, 88, 90, 127
- HIP, 60
- HMD, 50–53
- Illusions, 29
- Immersion, 36
- Impédance, 60, 70
- Implication, 36
- Interfaces Hommes Machines, 12
- Interréflexions, 56
- JND (Just Noticeable Difference), 27
- Kinesthésie, 70
 - Transparence kinesthésique, 70
- Kinesthésie, Proprioception, 26
 - Propriocepteurs, 26
- Latence, 43
 - Latence haptique, 43
 - Latence visuelle, 43
- Localisation dans l'espace, 82
- Logique Floue, 122
- Luminosité, 46
- Mécano-récepteurs, 24, 25, 27
 - Adaptation temporelle, 23
 - Mécano-récepteurs cutanés, 24
 - Mécano-récepteurs kinesthésiques, 27
 - Rapidly Adapting, 23
 - Slowly Adapting, 23

- Maintenance virtuelle, 17
Modalité haptique, 42
Montage, 18
Montage virtuel, 17
- Occlusions ambiantes, 56
Ombres portées, 56
- Parallaxe, 47, 48
Parallaxe de mouvement, 87
Perception des distances, 87
Perception multisensorielle, 30, 61
Photo-réalisme, 55
Pointeur, 58
Présence, 36, 41, 46
Priorité sensorielle, 32
Profondeur des yeux, 88, 89, 128
Proprioception, 70
Pseudo-haptique, 78
Psychologie, 28
Pulse Width Modulation (PWM), 64
- Qualité perçue, 10, 15
Questionnaire
 SUS, 37
 Witmer et Singer, 37
- Réalité augmentée, 17
Réfraction, 79
- Répétabilité, 18
Redondance, 46
Rendu haptique, 39
 Réponse réaliste ou symbolique, 41
Resimulation, 119
- Scénarisation dynamique, 107
Scénarisation statique, 92
Sensibilité somatique, 23
Stéréoscopie, 47
Substitution sensorielle, 33, 93
Synchronisation sensorielle, 31
Synchronisation visuo-haptique, 52
Systèmes à fils tendus, 75–77
Systèmes vibrotactile, 62–66
- Téléopération, 11, 18
 Téléopération collaborative, 19
Taux de rafraîchissement, 40
Tracking, 40, 82
Transparence, 79
- Uncanny Valley, 55
- Vallée de l'étrange, 55
Vergence oculaire, 90
- WYSIWYG, 3

Annexes

ANNEXE A

PUBLICATIONS

Les annexes A, B et C sont les articles qui ont été publiés pour chaque étude. Classés par date, on trouve successivement la première étude sur l'apport de l'haptique passive publiée dans *IEEE Transactions on Haptics*, puis sa suite en conditions de conduite publiée et présentée oralement le 8 septembre 2017 lors de *Driving Simulation Conference 2017*, Enfin, on trouve les recherches sur des méthodes de filtrage d'interaction soumis à *IEEE Computer Graphics and Applications*.

Performance evaluation of passive haptic feedback for tactile HMI design in CAVEs

Antoine Lassagne, Andras Kemeny, Javier Posselt, and Frederic Merienne

Abstract—This article presents a comparison of different haptic systems, which are designed to simulate flat Human Machine Interfaces (HMIs) like touchscreens in virtual environments (VEs) such as CAVEs, and their respective performance. We compare a tangible passive transparent slate to a classic tablet and a sensory substitution system. These systems were tested during a controlled experiment. The performance and impressions from 20 subjects were collected to understand more about the modalities in the given context. The results show that the preferences of the subjects are strongly related to the use-cases and needs. In terms of performance, passive haptics proved to be significantly useful, acting as a space reference and a real-time continuous calibration system, allowing subjects to have lower execution durations and relative errors. Sensory substitution induced perception drifts during the experiment, causing significant performance disparities, demonstrating the low robustness of perception when spatial cues are insufficiently available. Our findings offer a better understanding on the nature of perception drifts and the need of strong multisensory spatial markers for such use-cases in CAVEs. The importance of a relevant haptic modality specifically designed to match a precise use-case is also emphasized.

Index Terms—Haptics, Human-Machine Interfaces, Virtual Reality.

1 INTRODUCTION

DUe to the recent improvements in high performance immersive systems, haptic feedback has become increasingly sought after by users who want to touch what seems real. Furthermore, haptic modalities seem to be an efficient way to improve interactive capabilities of Virtual Reality (VR) systems. The feeling of touching virtual objects is not easily attained as technological barriers are numerous. Currently few companies offer devices for natural interactions with the environment which can be used in an industrial context.

2 RELATED WORK

2.1 Brief history

Haptic systems have been proposed since the very beginning of the development of VR. For example, in 1967 the GROPE project [1] was attempting to develop a force feedback mechanical arm with 2, 3 and finally 6 degrees of freedom (DOFs). Various more advanced systems emerged as VR started to grow in the early 90s, due to significant technological advancements which allowed for much greater computing power. For instance, *Cybergloves Systems* © proposed various products, from simple vibrotactile gloves to full haptic workstations with whole hand kinesthetic and cutaneous feedback. The SPIDAR collection [2], human-scaled systems made of taut strings and stepper motors, also emerged and became popular during these years. Meanwhile, *Sensable* © was releasing the Phantom Omni [3] (now called Geomagic Touch), which was one of the first affordable haptic devices. For over a decade, Haption © has been largely deploying haptic devices in spite of finding only a few early customers among the largest OEMs.

It has been established that haptic systems are necessary to improve the presence, the immersion and the performance [4], but also to reduce the cognitive load generated when vision is required to compensate for a lack of other perceptual cues [5]. With the recent maturity of high performance display systems and the large consumer deployment of head mounted displays (HMD), one can expect an increased interest in haptics in the years to come.

2.2 Haptics & CAVEs

Cave Automatic Virtual Environments (CAVEs) and HMDs have different constraints which often require a specific implementation. CAVEs do not overshadow the real environment, while HMDs do. HMDs thus do not need to deal with real objects mixed with virtual ones, like the human body, or with the intrusiveness of the systems.

CAVEs and similar display systems are broadly used by the automotive industry as VR tools. This is partly due to the high graphic quality and the ergonomics required by driving simulators, which deploy a lot of common technologies with CAVEs [6], but also to the simplified conception process offered by VR. However, haptic implementation is still troublesome in these immersive systems where the real environment cannot be fully hidden by the virtual one.

These devices thus have major criteria to meet to be compatible with CAVEs and industrial applications.

- Visual intrusiveness is a critical issue in CAVEs, as physical objects are visible. This may cause a critical reduction in immersion [7], with the usual results.
- Physical intrusiveness also needs to be minimized to fit ergonomics and accessibility requirements.
- All perceptual stimuli should be synchronized with the visible self to avoid any visuo-haptic conflict.

Manuscript received xxxxx XX, XXXX; revised xxxxxxxx XX, XXXX.

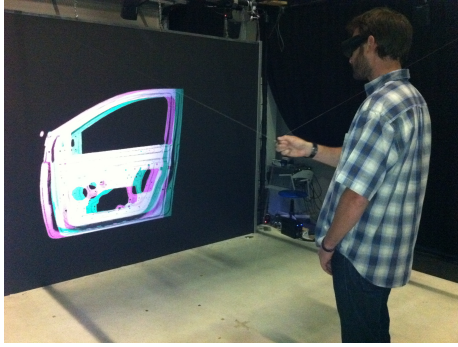


Fig. 1. A SPIDAR, providing kinesthetic feedback through taut strings.

- Haptic modalities (textures, kinesthesia, visual feedbacks, etc.) must respond to the use-case requirements.
- Industrial requirements must also be considered, which can be gathered through *usability*. There exists several definitions of usability with many different criteria like effectiveness, efficiency, learnability, attractiveness, security, operability, etc. [8]. In this study, we consider efficiency, effectiveness, and satisfaction of subjects (ISO 9241-11).

Several systems can be suited for use in CAVEs. Large scale SPIDARs [9] (figure 1), haptic arms, haptic gloves, or even non-contact haptic systems [10], [11]. Unfortunately, none of these are compatible with our use-case, due to deficiencies in fidelity, ergonomics, flexibility, robustness or flexibility.

2.3 Passive haptics

Passive haptics, also called *Augmented haptics* or *Pseudo-haptics* were also studied in many experiments. The idea is to oppose a tangible passive object, co-located with the virtual object, to the actions of the user [12], [13], [14]. The subject merges the real and virtual environments in a global one, with visual and haptic feedback, like in the experiment conducted by Hoffman [13]. Research showed that it significantly increases the sense of presence and global immersion [15], [16].

This method is affordable, safe, and does not need computation time. It provides a robust kinesthetic feedback as well as the appropriate cutaneous sensations, although it does not address every possible situation. Still, it is suited for a large number of use-cases, especially when it simulates simple shapes, and can render satisfactory kinesthetic feedback. Kinesthesia is the key to performance in eye-coordinated tasks whereas cutaneous feedbacks are more effective when rendering only simple alerts [17]. Some systems seek a compromise between several haptic modalities like textures, forms, compliance, temperature, inertia, friction, whereas focusing on a precise modality makes an efficient haptic system easier to attain.

Despite all of these strong advantages, there are a couple of drawbacks.

- One or many tangible objects need to be accurately adjusted, calibrated, or even built, for every change in the displayed scene, which decreases the flexibility of the virtual technologies. When using passive haptics, loading a simulation may take more time than launching a visual environment with a few clicks.
- Real objects cannot be overshadowed by any virtual object in CAVE-like displays. This causes unusual image overlap and corresponding distorted distance perception [18], thus only the foreground can render haptics.
- An accurate spatial calibration between real and virtual objects may be difficult to attain. This is mainly due to imprecisions in the virtual position of the eye, and unfortunately it causes great offsets between visual and haptic perception [19], [20], [21]. The position of the eye is difficult to take into account, as people have important morphologic disparities [22].

Passive haptics are implemented in Renault CAVE IRIS (Immersive Room and Interactive System) to allow the users to sit in a car and handle a steering wheel. However, the virtual parts are totally occulted by physical ones which cannot be modified easily. The physical parts need to be calibrated as accurately as possible and tracked with precision to match multiple environments, and these constraints rarely allow for a perfect visuo-haptic synchronization.

2.4 Sensory substitution

Sensory substitution is a substitution to haptic feedbacks by other sensory information, such as visual or auditory. These lighter solutions were considered to add interactive functionalities to VEs without heavy haptic implementation. Several studies concluded that visual or auditory cues helped users to know if and when a virtual collision occurred [23], [24], [25], [26], [27], [28], especially realistic cues like shadows or inter-reflections. Nevertheless, cues must be optimized for their effect to be positive. According to Kitagawa et al. [27], auditory cues may become intrusive while continuous and they are not as precise as visual ones while discrete. On the other hand, continuous visual cues are proven effective, but need to be seen by users while auditory ones do not.

Several studies concluded that the more visual cues there are, the stronger the space perception [29] and the easier the interaction becomes, although too many cues may increase the cognitive load or intrusiveness [26]. There were also experiments conducted to investigate which visual cues could be used, and when. Sreng et al. [28] concluded that visual glyphs like arrows or spheres were appreciated in the perception of distances and effort, whereas light sources were more effective to perceive contact locations. In general terms, continuous visual cues can provide continuous feedback capabilities from software and thus allow subjects to gain precision and accuracy.

3 CONTEXT OF THE WORK

The automotive industry investigates virtual technologies to avoid the production of physical prototypes which are

expensive and time consuming, but haptic modalities are needed in VEs lacking interaction capabilities [7]. Three haptic systems are tested in this experiment to evaluate if they could be of interest for dashboard HMI engineering design.

This study is focused on flat HMIs like touchscreens to satisfy the need of testing new designs of car computer interfaces while being in the cockpit, in context, not necessarily while driving. Such a system would allow the designers to evaluate the integration of their software creations inside the car, and the usage of the HMI with the right posture. Nowadays, HMIs are only tested on classic computers before they are integrated in an expansive physical prototype, not always in the exact configuration of the car.

This context is compatible with haptic systems which render only flat objects. The implementation is thus simplified and 3 interactive methods are considered.

- A sensory substitution based, visual-only, interaction system.
- An additional passive haptic device made of a transparent glass subjectively calibrated.
- A classic tablet fixed on an articulated arm.

The systems are evaluated in accordance with 3 criteria.

- **Performance** should be sufficient to allow effective interactions and feelings of confidence.
- **System Usability Scale** – Industrial usage requires a tool to be accessible to a large panel of users, and compatible with a large panel of use-cases.
- **Relevance**. Each haptic modality can respond to additional use-cases which must fit the context.

Finally, this experiment is carried out to evaluate how a subjective visual calibration, quickly made by each subject before beginning the experiment, can improve the quality of the visual coherence between the real and virtual parts. To have an efficient haptic feedback able to give self-confidence to the engineers who use the tool, real and virtual objects need to be perceived precisely in the same place.

4 RESEARCH PLAN

4.1 Scientific context

This research aims at studying the added value of haptic feedback in interacting in immersive VEs. It is focused on virtual touchscreen-like HMI design.

3 haptic modalities are evaluated. We dealt with different scientific barriers :

- **CAVE-related questions** like intrusiveness, visuo-haptic synchronization, and space perception. CAVEs cause specific issues that HMDs do not. Objects cannot be visually intrusive, physical and virtual parts are mixed within the environment (especially the body of the subject), space perception can be biased, anthropological parameters have an influence, etc.
- **Haptic system related questions**, specific to the modality (kinesthesia, cutaneous, sensory substitution, etc.) and the actual device implemented.

We also seek to study industry-compatible interaction systems, with every related additional constraint (ergonomics, robustness, accessibility).

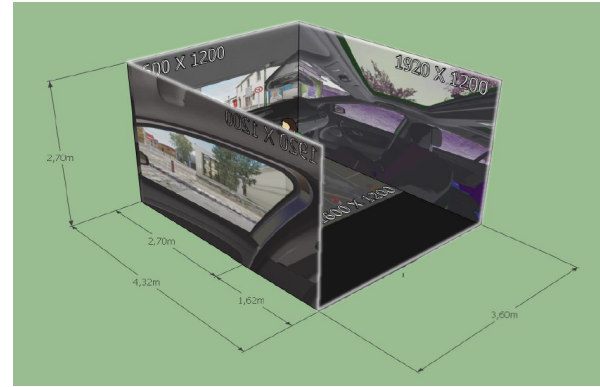


Fig. 2. P3I : Plate-forme d'Intégration Immersive Industrialisée.

4.2 Research questions and hypothesis

Our research questions are related to the added value of tangible interfaces in the context of a full visual immersive system (CAVE type) :

- To which extent a tangible interface brings a better sense of interaction in virtual immersion ?
- What is the precision of interaction in using a tangible interface ?

It is expected that a tangible interface is an added value for precision as well as user's confidence in the interaction, thanks to the space calibration process done with kinesthesia and haptic feedback. Thus, our hypothesis are the following :

- The precision of the interaction is better when using tangible feedback.
- The tangible interface brings a better comfort to the user in his interaction.

The study aims to grow the knowledge on transparent passive haptic systems and find new ways to improve them.

5 EXPERIMENTAL STUDIES

5.1 Virtual environment (VE)

This experiment took place at Renault, in the P3I (Plate-forme d'Intégration Immersive Industrialisée) CAVE (figure 2). This CAVE is a 4-faced immersive room, with front, floor, and two side walls. It is 2.7m high, 4.32m deep, 3.6m large and has high definition video projectors displaying every pixel in a 2.25mm square.

Head tracking is provided by 8 ARTtrack infrared cameras, as well as hand and finger tracking using an active fingertracking device with an alleged 1-millimeter precision. The VE is computed and displayed by Oktal SCANer Studio ©1.4, at a 60Hz frame rate, working with Catia V5 via TechViz middleware. Renault's Megane 4 interior is displayed and the outside environment is a reproduction of Guyancourt, France (figure 3).

A tracked car seat, co-located with the virtual seat allows subjects to sit down just like they would in a real car.



Fig. 3. The passive slate, nearly invisible in the environment during phase Y.

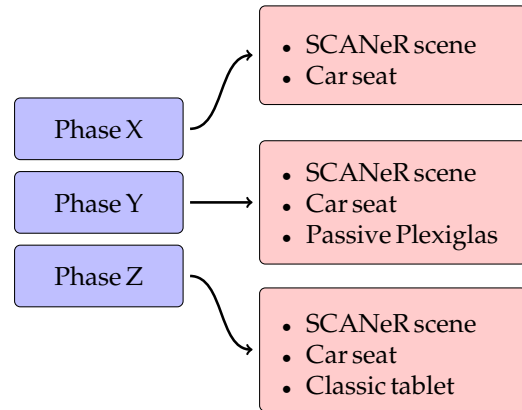


Fig. 4. Different haptic modes for different phases of the experiment. Phases are randomly ordered.

5.2 Experimental conditions

5.2.1 Interaction systems

3 different haptic modes are tested during the 3 phases (described fig. 4) called phase X, Y and Z.

- **Phase X - Sensory substitution.** Only the CAVE is used and no tangible haptic system is added. A green button, when pressed, would color itself into a darker green, and then turn back to white when released. Although it does not provide any force feedback, it does offer a way of interacting.
- **Phase Y - Passive haptics.** A transparent glass subjectively calibrated is placed in the CAVE to provide a tangible contact and a robust depth marker to rely on. Plexiglas is chosen for its great transparency, we can see in figure 3 that the system is nearly invisible.
- **Phase Z - Classic tablet.** The tablet is fixed on an articulated arm. The exact same software is displayed on it, and the interaction system is the multi-touch screen instead of the finger tracking glove. The tablet used is a Samsung Galaxy A6 with more than sufficient specifications

5.2.2 Methodology

The 3 phases are randomly ordered to avoid a learning bias, and they are attempted in a row in order for the subjects to have fresh memories of what they felt in the previous test. The phases are separated by questionnaires : one questionnaire about the interaction implementation and one presence questionnaire (adapted from Witmer and Singer's [30]), for each interaction modality. Within each phase, the subjects interact with the designated haptic mode as they would interact with the integrated touchscreen of a modern vehicle. The HMI is a simple 4-button interface, as illustrated in figure 5.

Phases sequencing – Each phase consists of 2 series, which are differentiated by the size of the buttons. The buttons of the first series are much bigger than the ones of the second series, as shown in figure 5.

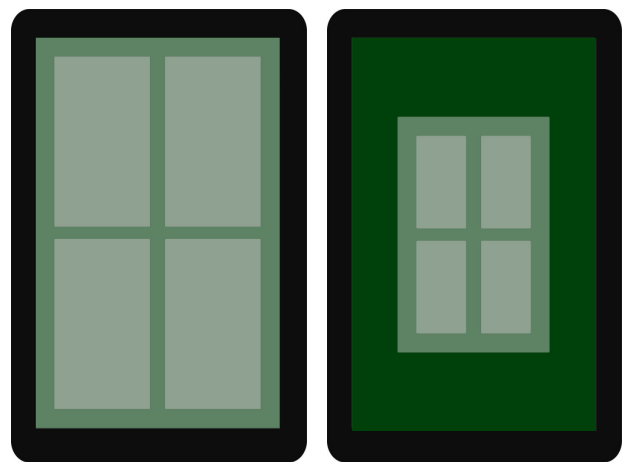


Fig. 5. There are only 4 buttons in the HMI, with two different scales.

A series consists of 20 successive interactions on the interface. To trigger every interaction, one of the 4 buttons on the interface turns green. The subject is tasked to touch the center of the button when this occurs. Once it is touched, the button turns grey again and the interface waits for a random duration before triggering the next interaction.

Subjects are instructed to touch precisely the center of the button, with a constant speed. They are also asked to put their hand on their knee between each interaction, to ensure regularity. The subjects are aware that their interaction durations are timed and their accuracy is being measured. At the end of a series, we save the collected data : response duration, relative error of each interaction, and the subjects' comments verbatim.

5.2.3 Latency

In addition to the usual latencies produced by the CAVE, we face two specific delays during our experiment.

- **Streaming latencies** : the HMI is streamed to the CAVE from another computer through the network. The HMI is refreshed 100ms late due to this configuration.

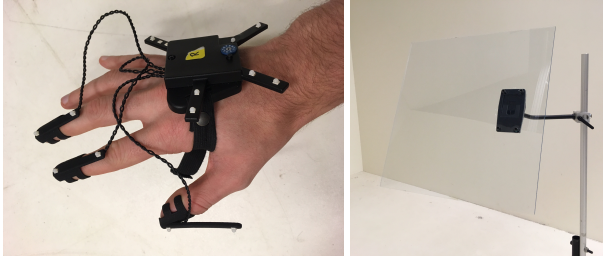


Fig. 6. A.R.T. Finger tracking device and the passive glass.

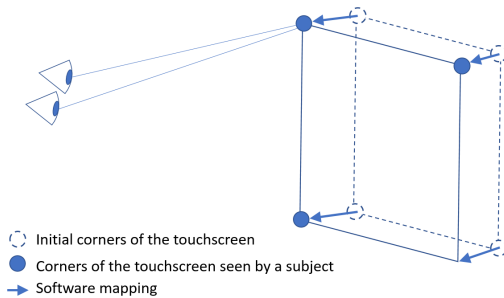


Fig. 7. The software maps the interaction system with the subjective calibration proceeded by the subject.

- Interaction latencies : the tracking system and its network flow causes a 50ms latency.

These latencies occur only in virtual modes and not when subjects interact with the tablet. They are identical during both virtual modes as the tangible Plexiglas is only a passive object.

5.3 Subjective calibration

For every haptic mode, subjective calibration is conducted instead of analytic calibration.

- The physical parts are adjusted by the subjects until they coincide with virtual parts to their own vision (when there are physical parts).
- The interaction engine is localized where the subjects can see it. They are asked to successively touch 3 corners of the virtual touchscreen (except when using the tablet), and the interaction system is mapped on this calibration, as represented in figure 7. Every action is theoretically taken into account 0.5mm before the subject actually touches the glass to avoid erratic behavior.

In early experiments, analytic calibration (provided by measuring the interpupillary distance (IPD) of subjects and tracking the passive object) did not provide satisfactory accuracy. The subjects were complaining about a spatial offset between what they could see and what they could touch. Measuring the IPD obviously improves depth and scale perception, but is not always enough. It is measured to get a more accurate position of the eyes of the user, interpolated from his tracked 3D glasses, but there are other parameters influencing distance perception accuracy. Nose height and eye depth should be measured, as well

as anything that has an influence on the location of the 3D glasses. The 3D glasses should also have sufficiently robust positioning on the subject, and be placed the same after a subject removes them and wears them again. When the location of the actual eye of the subject is not precisely known by the system, the vision frustrums cannot be computed accurately and this lead to spatial bias.

These constraints, in addition to the privacy issues caused by the company in the case that we collected and stored morphologic data, led us to consider a subjective calibration. It was found more accurate by early testers, but still not perfect. Further experiments should improve subjective calibration, perhaps combining it with analytic calibration, as it does not resolve all issues. Notably, the subjects should keep the same posture as during the calibration while interacting, and the same gaze direction (a straight forward gaze in our experiment) as well. If the subjective calibration is performed while looking straight forward, switching to lateral vision would corrupt it.

5.4 Subject Panel

20 subjects took part in this experiment. To ensure confidentiality, each one of them is a Renault employee working in Guyancourt. Coming from various fields of work, half of them were totally VR-naive (they had never used a virtual reality immersive system before). The other half were experts. Males and females, most of them were between 25 and 50 years old. Their specificities were known by questionnaires, oral questions, and verbatim records. Their feelings were collected between each phase via our questionnaires. Our numerical analysis is only based on 17 subjects, as there were subjects unable to succeed every phase or who provided aberrant results.

5.5 Measurements

3 indicators are used to evaluate the performance of the subjects. Every action is timed from the moment when a button turns green to when it is touched by the subject. Vertical and horizontal relative errors are measured by the software as the corresponding projection of the distance between the interaction and the actual center of the button. The third indicator is the questionnaire ratings. We also analyze verbatim records (Subjects are asked to comment each difficulty they encounter and to report whatever is crossing their mind) to complement these indicators.

The subjects were allowed to compare their different questionnaires when filling them out, and were all told that our interest is only in the differences between modes, not in the absolute values.

6 RESULTS

6.1 Execution duration

Data on execution duration can be observed in figure 8. The Student's t-Test for paired samples was used for the comparison of two phases (the differences are normally distributed according to Shapiro-Wilk Normality Test). We found a significant difference ($p < 0.05$) of execution duration between haptic modes. The fastest mode was with the tablet (Z), with

which the subjects' interaction took an average time of 1.5 seconds. Compared to this duration, both phase X (sensory substitution) and Y (Plexiglas) are slower. Phase X is also significantly slower than Y, twice the value of Z. However, this does not prove on its own that phase Z is superior. Lots of subjects did not appreciate it for the immersion experience, although every one of them emphasized that the tablet offered a more reliable interaction than any other system.

We identified two reasons for the poor performance in the virtual phases :

- **The reliability of perception** was a handicap for a few subjects whose spatial perception drifted over the course of the experiment. Some of them could not get to the end of the visual-only phase, and most of them sometimes had to try twice or more to achieve an action. This phenomenon also happened with the transparent glass, but was stronger and more frequent without it. The subjects would go deeper and deeper through the button, recalibrating their perception until they would not see the button on the same place than before. A perception recalibration and a one minute pause could often solve the problem, as discussed later. There were 6 recalibrations needed during phase X, and just one during phase Y.
- **Irresolution**, meaning the subjects slow their moves due to a lack of self-confidence, is also a major cause. Even when removing every interaction slowed by a reliability issue, the average duration of phase Y is longer than phase Z. The subjects are not as confident as they would be in real conditions and they slow their moves accordingly. This situation is worse during phase X, and there are greater disparities : standard deviation between means of subjects is almost twice as high as during phase Y and many subjects achieved a poor performance.

6.2 Relative error

Relative error is analyzed and represented in figure 9. It was measured for each interaction and represents its position compared to the center of the button which was supposed to be touched. Although the A.R.T finger tracking device was found to be conclusive, we prefer to analyze repeatability to avoid any bias due to a constant shift in the tracking system. Once again, Student's t-Tests for paired samples were used to analyze differences among the modalities (the differences are normally distributed according to Shapiro-Wilk Normality Test).

While phase Y and Z have approximately the same mean standard deviation, phase X has a significantly higher value ($p < 0.05$). There are also more disparities between subjects, as the variance of variances is much higher. These differences are mainly due to perception uncertainty and shifts occurring during this phase. Different subjects reported that they felt the button was getting further and further away from them, until their interaction would not work anymore. On the computer, the operator could see their interactions

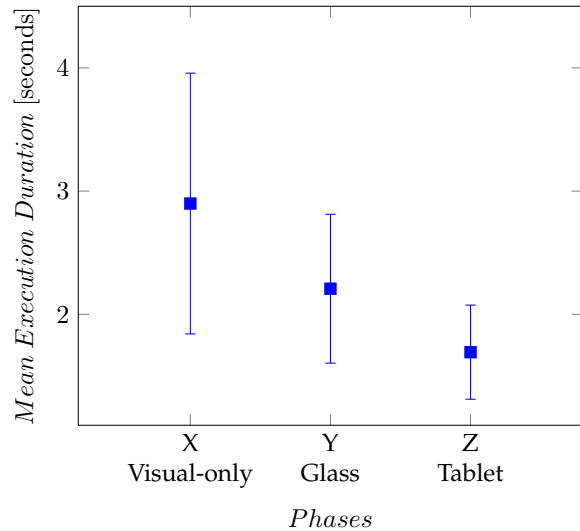


Fig. 8. Mean duration of interaction for each subject. Apart from a few points, we can see a global tendency where phase Z is faster than phase Y, which is faster than phase X.

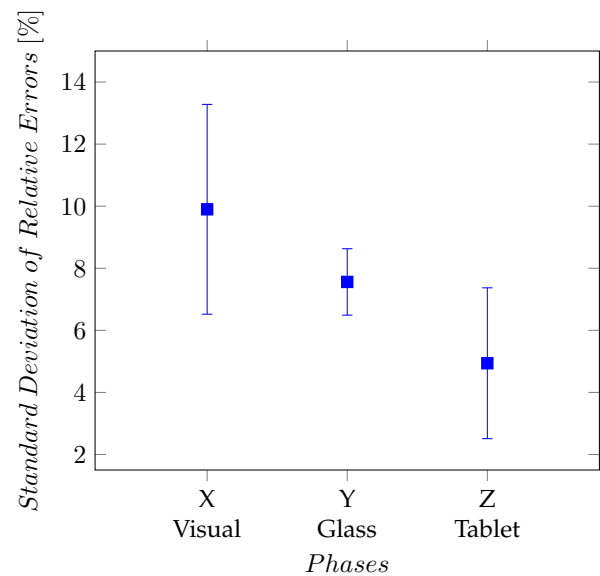


Fig. 9. Standard deviation of mean relative error for each subject. Again, a few users could be efficient with system X or Y, but most of them lacked accuracy and regularity.

progressively drifting to the left, because their move would intersect the virtual screen earlier than they thought. The software was designed to prevent them from realizing that they were shifting ; they only receive the information that they touched the button or not, not where they had touched it.

Finally, we can see on the graph that the standard deviation of standard deviations of relative errors is higher during phase Z. We assume that some subjects did not take phase Z as seriously as X and Y, as they all were familiar with tablets. Even though we specifically asked them many times to touch precisely the center of the buttons, the subjects were less focused during this phase.

6.3 Subjects judgment

Each mode received specific recurrent reports from subjects.

6.3.1 Sensory substitution mode

This mode could be frustrating when the subjects thought they had touched the button but the system would not take it into account. When the calibration was correct, the subjects reported this mode as surprisingly pleasant to use, and the color cue was much appreciated. Several subjects reported that they enjoyed the fact that there were two color changes, one when they would press the button and one when they would release it.

6.3.2 Passive Plexiglas mode

Being able to forget about depth issues and to lower the cognitive load and the uncertainty induced was much appreciated, but subjects sometimes had to put more pressure on the glass when the system would not react. Some subjects were especially happy with the glass placement, reporting that this precise calibration rendered a nice feeling. The system lacked a bit of robustness and rigidity and it can still be improved. The A.R.T glove structure could sometimes interfere between the glass and the skin, leading to a quality contact deterioration.

6.3.3 Real tablet mode

The tablet provided excellent interaction during phase Z, but impaired the VE due to contrast and brightness disparities. It caused a drastic reduction in immersion, and some subjects even wondered in which purpose the CAVE served. These subjects thought that the tablet experience would have been better without the CAVE, as the 3D glasses deteriorated the displayed image with their polarization. On the other hand, the subjects who were expecting an immersive experience reported that this phase was weird, easy to succeed but unpleasant and not necessarily an effective tool to work with.

6.4 Questionnaires

Concerning the questionnaires, phase Y obtained on average higher scores (nearly 50%) than phase X in the system specific category, while phase Z received even higher scores than phase Y. This questionnaire is mainly focused on the performance, with questions about self confidence in interaction, delay perception and global experience quality. Considering these results added to the corresponding performance, we assume that the glass helped people in their virtual interactions. The verbatim records confirm this assessment. Finally, several subjects reported that even so their performance felt better during phase Z, the very low immersion made it feel irrelevant to the use-case of virtual HMI design.

Delay perception

Although latency is well known, we still asked subjects to rate the delay they perceived from 1 to 5, 1 being the best rate. We discovered that perceived latency is related to the performance of the subjects. The subjects who had difficulty interacting often blamed latency. For that reason, the mean

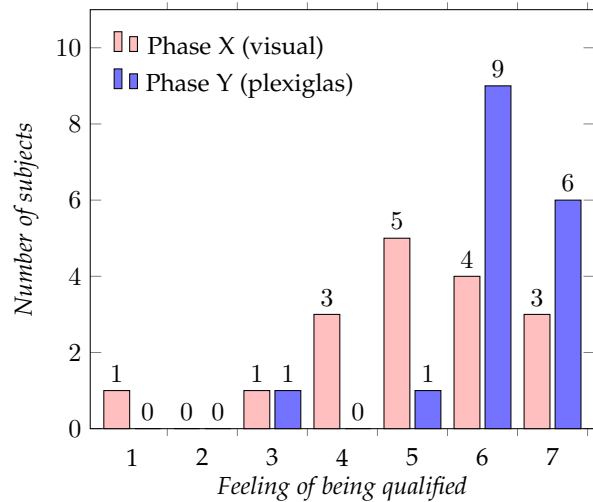


Fig. 10. The feeling of being skilled between phases X and Y.

rate of perceived latency obtained is a lot higher in sensory substitution mode (2.6) than in passive haptics mode (1.5). On the other hand, people who had no issue interacting reported that the latencies were detectable but low.

Confidence

In the presence questionnaire, we asked the subjects to rate their feeling of being qualified while using the current system from 1 to 7. We had significant results ($p < 0.01$ according to Wilcoxon signed rank test) showing that subjects felt much more qualified during phase Y than during phase X, as we can see in figure 10. Phase Z obtained heterogeneous grades, as subjects suffered from the lack of immersion: They may have felt confident in their interaction, but they did not in their evaluation of the vehicle HMI in context, which would be the real goal.

The remaining results of the presence questionnaire are less relevant, as phase Z obtains the same mean score than Y, only a little higher than X, whereas many subjects complained about the low quality of immersion while they were using the tablet. Witmer and Singer's questionnaire may not be appropriate for our research, as it contains only a few questions dedicated to haptics and interactions.

7 DISCUSSION

7.1 Preferred system

In this experiment, none of the interaction modes were unanimously favored by all the subjects, regardless of the significant usability differences found in the results. They were asked to defend their point of view. Their arguments led us to conclude that when first seeing the system, every subject had his own idea of how it could serve specific use-cases, and these ideas ruled their expectations. Depending on what was their initial opinion about virtual technologies and if they were expert in HMIs development for car interiors, they nearly had chosen their system before beginning the experiment.

- Subjects who preferred phase X were mostly VR experts who expected an interactive system, not necessarily in this particular context. In their opinion, they were testing an interaction module to use with CAVEs in various applications.
- Subjects who preferred phase Y were VR naive and experts. They appreciated having a tangible and precise force feedback to oppose their moves and enhance their performance, in contrast with the sensory substitution mode which could lead to difficulties. In their opinion, they were testing a vehicle dashboard HMI in a realistic environment, just like if they were in a physical car, to simulate the car interior specificities.
- Subjects who preferred phase Z wondered why VR would be of any interest for dashboard HMI development. In this state of mind, they were not paying attention to the whole VE and they reported that they would have preferred being simply in their office with the tablet.

With this study, we emphasize that haptic modalities are use-case dependent and need to be implemented accordingly. There is also a performance factor, which granted phase Y better rates than other phases.

7.2 Application area and limitations

We observe that these haptic implementations would not fit the same application area.

- Sensory substitution can be implemented in most scenarios, as it just needs collision detection, but this flexibility has a price paid in usability.
- Transparent passive haptics, as we implemented it, only work in specific situations, like car flat tactile HMI design. Targets must be flat, static, and have simple shapes.

Improving the usability of sensory substitution may allow its use in a wider application area than passive haptics, but it is not conclusive for our use-case yet.

7.3 Recalibrations

Lots of subjects had their spatial perception shifted after a while during phase X, losing their references in the VE progressively. In the end, some of them would see the buttons in another place and their following interactions were all in error. Six subjects needed a perception recalibration during phase X and 4 subjects were able to take benefit from it. The recalibration consisted of asking them to look somewhere else on the scene, to look at themselves, to close their eyes for a few seconds. After those simple acts, they were once again able to interact.

These recalibrations were required only once during phase Y. We suppose that the tangible Plexiglas is a strong enough depth mark on which subjects' perception system can rely. Discrete recalibration of subjects perceptions were studied in the past [31], and continuous recalibration may enhance the usability of fully visual modalities when perception robustness lacks.

7.4 Inter-subject disparities

Subjects adapted differently to phases X and Y, and more disparities were revealed during phase X. Both standard deviation of mean execution durations and standard deviation of standard deviations of relative errors are significantly lower during phase Y than during phase X. Additionally, there were more subjects failing phase X, or frustrated by it, than any other phase. This makes us assume that sensory substitution is more difficult to handle, and subjects with a lower level of adaptability were handicapped. As expected, people who were familiar with CAVEs and stereoscopy achieved a decent performance during phase X, whereas VR-naive subjects often could not. The added value provided by the passive transparent glass was more pronounced with these subjects who approached the performance attained by experts.

Finally, and once again, phase Z provided the lowest performance disparities, in spite of the subjects' overall opinion.

7.5 Learning in the loop

A simple in-the-loop learning process was tested with a few subjects in sensory substitution mode. As the subject interacted, the operator informed them orally of their spatial error (long shift on the right, short shift on the top...). Results were impressive and subjects were able to be as accurate as during phase Z after only a few guided interactions and without additional information. A dedicated experiment with several different software-based in-the-loop learning cues would certainly be of interest, and would probably allow companies to find a reliable interactive modality which could be used in various work fields.

To synchronize the perception of the subjects with the visual and tracking system, we are not limited to the method of teaching users how to adapt their perception via visual or oral guidance. A strong self-correcting software could also be a solution which would need further study to be efficient and reliable.

7.6 Driving simulation situation

A simulated driving situation would introduce major differences, and thus require further studies.

- A moving environment continuously renews all spatial cues (depth, scales) and it may significantly reduce the perception shifts we encountered.
- Interacting with the HMI while driving is less important than safety. Users cannot keep their sight on the screen for too long, thus they will use either central vision for short durations or peripheral vision, which is not as efficient as central vision in many aspects [32], [33].
- The context itself also has influence over the haptic performance [34] and may influence the results as users would have a different focus.

8 CONCLUSION

In this article, we compared different haptic modes for tactile dashboard HMI design in a CAVE in order to measure the added value of tangible interfaces. We tested a simple

sensory substitution system based on discrete visual cues, a passive haptic system made of a tangible transparent glass, and a classic tablet. The transparent passive haptic system allowed significant improvements in usability compared to sensory substitution. It enhanced usability through significant gain in accuracy, efficiency and self-confidence bringing a better user experience. We could thus show that the proposed tangible interface provides significantly more robust spatial haptic cues. Finally the tablet in spite of good performance was not well accepted as natural interface by subjects who reported a reduction in immersion.

Perspectives

In-the-loop learning - More multisensory cues could be added to continuously help users interact. In addition, software would take advantage of detecting these shifts and adapt in real time.

Driving simulation context - Driving situations modify mental workload and performance while interacting with HMI. Future work will be carried out to study haptic modalities in driving situations.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by a cooperation between Renault Group and Arts et Métiers Engineering School. We would like to thank particularly Renault Group for providing the materials and software we used in this experiment.

REFERENCES

- [1] F. P. Brooks, M. Ouh-Young, J. J. Batter, and P. J. Kilpatrick, "Project GROPE-HapticDisplays for Scientific Visualization," 1967.
- [2] M. Sato, "Space Interface Device for Artificial Reality-SPIDAR," *The Transactions of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers*, vol. 74, no. 7, pp. 887–894, 1991.
- [3] T. H. Massie, J. K. Salisbury, and others, "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects," in *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, vol. 55. Citeseer, 1994, pp. 295–300.
- [4] F. P. Brooks, "What's real about virtual reality?" *IEEE Computer graphics and applications*, vol. 19, no. 6, pp. 16–27, 1999.
- [5] G. Robles-De-La-Torre, "The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments," *IEEE Multimedia*, vol. 13, no. 3, pp. 24–30, Jul. 2006.
- [6] A. Kemeny, "From driving simulation to Virtual Reality," in *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*. ACM, 2014, p. 32.
- [7] R. Scheibe, M. Moehring, and B. Froehlich, "Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments." IEEE, 2007.
- [8] A. Assila, "An approach and a tool for subjective and objective evaluation of the usability of interactive systems : application to passengers information assistance system," Theses, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Sep. 2016. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01411235>
- [9] L. Buoguila, Y. Cai, and M. Sato, "New haptic device for human scale virtual environment Scaleable-SPIDAR," in *ICAT*, vol. 97, 1997, pp. 93–98.
- [10] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, and A. Israr, "AIREAL: interactive tactile experiences in free air," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, no. 4, p. 1, Jul. 2013.
- [11] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces." ACM Press, 2013, pp. 505–514.
- [12] B. Bayart, "Réalité augmentée haptique : théorie et applications," Ph.D. dissertation, 2007, thèse de doctorat dirigée par Kheddar, Abderrahmane Robotique Evry-Val d'Essonne 2007EVRY0035.
- [13] H. Hoffman, "Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments." IEEE Comput. Soc, 1998, pp. 59–63.
- [14] A. Lecuyer, C. Andriot, and A. Crosnier, "Interfaces haptiques et pseudo-haptiques," *Proceedings of INRR*, vol. 3, 2003.
- [15] B. E. Insko, "Passive haptics significantly enhances virtual environments," Ph.D. dissertation, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.
- [16] A. S. Carlin, H. G. Hoffman, and S. Weghorst, "Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report," *Behaviour Research and Therapy*, vol. 35, no. 2, pp. 153–158, Feb. 1997.
- [17] K. Hale and K. Stanney, "Haptic rendering - beyond visual computing - Deriving haptic design guidelines from human physiological, psychophysical, and neurological foundations," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 33–39, Mar. 2004.
- [18] P. Fuchs and G. Moreau, *Le traité de la réalité virtuelle*. Presses des MINES, 2006, vol. 2.
- [19] J. P. Wann, S. Rushton, and M. Mon-Williams, "Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments," *Vision Research*, vol. 35, no. 19, pp. 2731–2736, Oct. 1995.
- [20] K. B. Chen, R. A. Kimmel, A. Bartholomew, K. Ponto, M. L. Gleicher, and R. G. Radwin, "Manually locating physical and virtual reality objects," *Human Factors*, vol. 56, no. 6, pp. 1163–1176, Sep. 2014.
- [21] R. V. Kenyon, D. Sandin, R. C. Smith, R. Pawlicki, and T. Defanti, "Size-Constancy in the CAVE," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 16, no. 2, pp. 172–187, Apr. 2007. [Online]. Available: <http://www.mitpressjournals.org/doi/abs/10.1162/pres.16.2.172>
- [22] N. A. Dodgson, "Variation and extrema of human interpupillary distance," A. J. Woods, J. O. Merritt, S. A. Benton, and M. T. Bolas, Eds., May 2004, pp. 36–46.
- [23] L.-W. Chan, H.-S. Kao, M. Y. Chen, M.-S. Lee, J. Hsu, and Y.-P. Hung, "Touching the void: direct-touch interaction for intangible displays." ACM Press, 2010, p. 2625.
- [24] H. H. Hu, A. A. Gooch, W. B. Thompson, B. E. Smits, J. J. Rieser, and P. Shirley, "Visual cues for imminent object contact in realistic virtual environment," in *Proceedings of the conference on Visualization'00*. IEEE Computer Society Press, 2000, pp. 179–185.
- [25] C. Madison, W. Thompson, D. Kersten, P. Shirley, and B. Smits, "Use of interreflection and shadow for surface contact," *Perception & Psychophysics*, vol. 63, no. 2, pp. 187–194, Feb. 2001.
- [26] B. Petzold, M. F. Zaeh, B. Faerber, B. Deml, H. Egermeier, J. Schilp, and S. Clarke, "A study on visual, auditory, and haptic feedback for assembly tasks," *Presence: teleoperators and virtual environments*, vol. 13, no. 1, pp. 16–21, 2004.
- [27] M. Kitagawa, D. Dokko, A. M. Okamura, B. T. Bethea, and D. D. Yuh, "Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for surgical teleoperation," *Studies in health technology and informatics*, pp. 157–163, 2004.
- [28] J. Sreng, A. Lecuyer, C. Megard, and C. Andriot, "Using Visual Cues of Contact to Improve Interactive Manipulation of Virtual Objects in Industrial Assembly/Maintenance Simulations," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, no. 5, pp. 1013–1020, Sep. 2006.
- [29] M. O. Ernst and H. H. Bühlhoff, "Merging the senses into a robust percept," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 162–169, Apr. 2004.
- [30] B. G. Witmer and M. J. Singer, "Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 7, no. 3, pp. 225–240, Jun. 1998.
- [31] J. E. Atkins, R. A. Jacobs, and D. C. Knill, "Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts," *Vision Research*, vol. 43, no. 25, pp. 2603–2613, Nov. 2003.
- [32] H. Strasburger, I. Rentschler, and M. Jüttner, "Peripheral vision and pattern recognition: A review," *Journal of Vision*, vol. 11, no. 5, pp. 13–13, Dec. 2011.
- [33] Soichiando, N. K. A, and S. Oda, "Central and peripheral visual reaction time of soccer players and athletes," *Perceptual and Motor Skills*, vol. 92, no. 3, pp. 786–794, Jun. 2001.
- [34] J. E. Atkins, J. Fiser, and R. A. Jacobs, "Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts," *Vision Research*, vol. 41, no. 4, pp. 449–461, Feb. 2001.



Antoine Lassagne received a Master in Engineering from Arts et Métiers, Paris in 2015. He is currently working on a PhD with the Laboratory of Immersive Visualization and with Renault Group. He is interested in haptic rendering and virtual reality.



Pr. Andras Kemeny is the Director of the Laboratory of Immersive Visualization, a joint Renault - Arts et Métiers ParisTech research laboratory. He has initiated and directed the development of a driving simulation software package, SCANeR Studio©, a worldwide leader and a major development and assessment driver in the loop (DIL) simulation tool for Automotive Driver Assistance Systems (ADAS), Human Machine Interfaces (HMI), autonomous and connected vehicles, deployed at a large number of automotive OEMs,

suppliers and research laboratories.

Pr. Kemeny is also Associate Professor at Arts et Métiers ParisTech and author of more than 150 scientific and technical papers and book chapters as well as several industrial patents and software copyrights.



Javier Posselt is member of Renault's Advanced Driving Simulation & Virtual Reality department since 2010 as project manager in Virtual and Mixed reality systems. He received his PhD in robotics on 1996 at Université Pierre et Marie Curie. For 15 years, he is project manager on projects involving industrial process simulation (virtual factory), and digital mockup assessment using virtual and mixed reality systems. He managed French national and international collaborative projects in the area of virtual reality.

He was project manager of the first high quality projection CAVE of Renault inaugurated in 2013.



Pr. Frederic Merienne is currently professor at Arts et Métiers and director of the Image Institute, a research team of the Le2i Laboratory, since 2004. He received his PhD in 1996 at the National Polytechnical Institute of Grenoble (INPG). His research interests are focused on virtual immersion linked with engineering, cultural heritage and health applications. He is the author of many scientific papers in virtual reality and related disciplines. He is involved in different projects with industrial partners, and initiated

international collaborative projects in the area of virtual reality with universities in the USA, Australia, Colombia and Malaysia.

Comparing Tangible and Fully Virtual Haptic Systems for HMI Studies in Simulated Driving Situations

Antoine Lassagne^{1,2}, Andras Kemeny^{1,2}, Javier Posselt¹ and Frederic Merienne²

(1) Renault, Autonomous Driving and Virtual Reality, TCR AVA 013, 1 avenue du golf, 78288 Guyancourt, France, e-mail: {antoine.lassagne, andras.kemeny, javier.posselt}@renault.com

(2) Le2i FRE 2005, Arts et Métiers, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, HeSam, France, e-mail: {antoine.lassagne, frederic.merienne}@ensam.eu

Abstract - *The contribution of tangible and intangible feedback is compared for virtual tactile car Human-Machine Interfaces (HMI) design, to measure their performance both in static conditions and while driving. A subjectively calibrated transparent glass provides tangible passive haptics, and visual cues are used to study sensory substitution-based intangible interactions. The results show that the performance of the subjects was significantly improved in driving conditions as they interacted faster, more accurately and with a higher satisfaction. In addition, our findings highlight that the contribution of tangible systems is significantly lower in driving conditions, raising new questions about the nature of haptic modalities in the function of the context of use. This study provides additional knowledge about the influence of dynamic environments and external tasks on haptic perception.*

Keywords: *Automotive design, HMI, haptics, perception, virtual reality.*

Introduction

Virtual Reality (VR) has many applications in automotive industry, especially in engineering design. However, haptic feedback may offer new capabilities to simulators, allowing effective interactions and improved perception to enhance the immersion [Bro99]. HMI testing is one of many use-cases that inherently requires interactions.

Passive Haptics

Passive haptic consists of opposing tangible objects, co-located with virtual objects which need haptics. Hoffman et al. [Hof98] reached a satisfactory haptic feedback by introducing physical plates into a virtual environment (VE). Carlin et al. [Car97] evaluated the possibility of curing spider phobia through a similar implementation and also provided promising results. Insko et al. [Ins01] significantly improved presence in a visual-cliff environment augmented by means of passive haptics. They all concluded that passive haptic generates appropriate haptic feedback in various situations, and they emphasize the added value of adding haptic capabilities to VE, especially passive haptic which is safe, affordable, simple to implement and requires no continuous computation.

Intangible haptics

Previous research has proposed intangible haptic systems with sensory substitution, effective in numerous uses. Realistic visual cues like inter-reflections or shadows [Hu00, Mad01, Cha10] provided significant

performance improvement in interactions. Kitagawa et al. [Kit04] measured the accuracy of subjects applying force in the presence of visual and auditory non-realistic cues and showed that continuous visual cues significantly improve performance, while auditory should be discrete for intrusiveness issues. In similar studies, Petzold et al. [Pet04] concluded that despite the advantages of sensory substitution, there exists an additional cognitive burden of translating sensory information other than haptic into force.

Spatial Perception in VEs

Perception of depth and scale is not always accurate in VEs and it can deteriorate the haptic when not taken into consideration. According to different studies [Ken07, Loo96, Cut95], the environment should include a lot of surrounding objects to enhance spatial perception, and there exist important disparities between subjects. Research also demonstrated that high visual quality may improve spatial perception [Int06]. In driving simulation, motion parallax and egocentric direction are sources of information, as discussed by Kemeny et al. [Kem03].

CAVE systems bring additional sources of bias.

- Glaze tracking is often interpolated from head tracking. Morphological disparities like interpupillary distance [Dod04], eye depth and nose type lead to errors in the interpolation. Depth and slant distance perception suffer from these disparities.
- Vergence-accommodation conflicts weaken the robustness of spatial perception [Wan95].

Haptic devices require accurate spatial perception to render haptic in coordination with vision. On the other hand, haptics should improve spatial perception by providing more perceptual information to subjects [Ern04, Bur10].

Tactile dashboard HMI design

Previous results compared tangible and intangible interfaces in static conditions [Las17]. It provided an evaluation of different haptic systems for tactile dashboard HMI design and highlighted several issues.

- The tangible interface significantly enhanced usability in comparison with the visual-only interface which was difficult to interact with.
- A lack of robustness in human spatial perception was identified as a major obstacle to VEs interaction, especially when no tangible haptic system can provide additional space references.

Subjects were not driving during this experiment. Further studies are thus needed in a driving context to complete this evaluation. The final goal would be to implement such a system as an effective engineering tool.

Research Questions

This study aims at comparing the performances of haptic systems in different contexts in immersive VEs. We seek to study how a dynamic environment and a driving task can lead to performance differences when compared to the static situation previously studied.

Our questions of research are the following :

- To which extent a dynamic environment and a driving task modify the performance of interactive systems in immersive environments ?
- Is this influence different between several haptic modalities with known performances ?

We expect major differences in comparison with a static context due to two factors.

- The cognitive burden induced by driving should force subjects to focus and may improve their performance.
- We expect a continuously renewed environment to decrease the perceptual shifts observed in static situations, as demonstrated by Atkins et al. [Atk01, Atk03].

Methodology

11 subjects (males and females, Renault employees) were instructed to interact with a simple virtual tactile dashboard HMI in the CAVE while driving. The interface displayed 4 buttons with 3 scales. Subjects successively employed intangible and tangible interaction systems to proceed with 2 (intangible, tangible) * 3 (button scales) series, in a random order. During series, 20 interactions were called by the HMI (one button turns green until the subject touches it). The flow of series is described in figure 1.

As performance indicators, we measured execution duration, relative error, and two questionnaires were filled out by subjects, corresponding to tangible and intangible haptic modes.

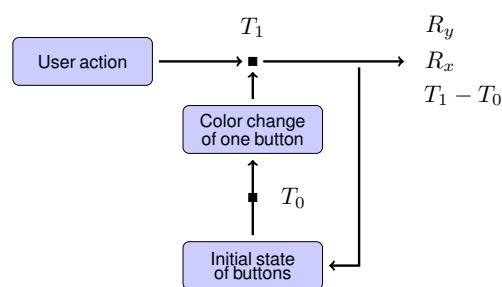


Figure 1: Flow of a single serie. Relative errors (R_x, R_y) represent the relative offset between the location of the interaction and the actual center of the button. $T_1 - T_0$ is the time spent by the user to perform an interaction.

These experiments took place in Renault P3I (Industrial Immersive Integration Platform) CAVE, a 4-sided virtual reality room powered by ultra-short throw full HD Panasonic projectors. We use active stereoscopy and optical tracking with A.R.T. infrared technologies[†]. Interaction implementation is described below :

- Intangible feedbacks : color changes from the interface, no haptic feedback.
- Tangible feedback : a passive transparent glass attached to a support is added.

In addition, a 3-finger tracked glove is used to acquire interactions.

The virtual scene was displayed by Oktal SCANer Studio [Kem93] and placed users inside a car in driving conditions (figure 2). Logitech G25 steering wheel was dedicated to driving. Theoretical latency was under 30ms with this setup.

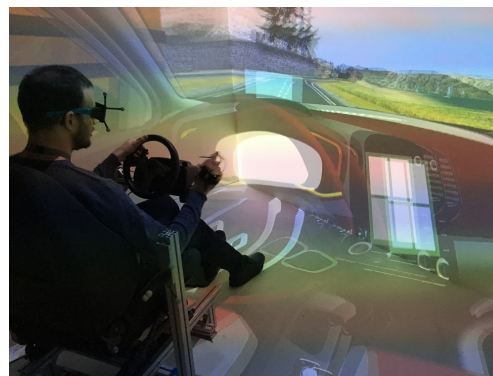


Figure 2: Subject immersed in the VE.

The methodology and apparatus were identical during static studies, except for the smallest scale. 17 subjects took part in static studies, 3 of them took part in both experiments.

Subjective calibration Consistency between vision and interactions was attained by means of a subjective calibration. This calibration allowed us to bypass morphologic disparities. Subjects were instructed to successively touch 3 corners of the virtual touchscreen to map the collision engine to their perceived visual location (figure 3).

[†] <http://www.ar-tracking.com/home/>

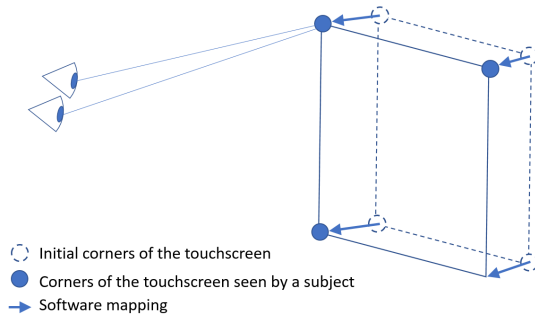


Figure 3: Subjective calibration allowing accurate visuo-haptic consistency.

When the transparent glass was in use, it was placed by subjects on what they reported was the right location. We put a particular attention on this step, as misplaced glasses had highly degraded the experiment during preparation.

Results

Student's t-Test was used for the statistical analysis of paired samples among the different conditions (tangible or intangible interactions, static or dynamic scenarios), with a significance level of 5%.

Execution duration

The data comparison of execution duration is displayed in figure 4. The static study resulted in significant performance differences between intangible and tangible systems. Driving simulation conditions provided the following results :

- Interactions with the intangible system were significantly (~ 33%) faster while driving.
- The tangible system had a lower potential for improvement as it already provided low execution duration. It still improved moderately.
- Standard deviation of execution duration without tangible interface has been highly reduced.

Driving conditions led to a higher performance for both intangible and tangible studies. These conditions were more advantageous to the intangible interaction system which could almost attain the same level of performance as the tangible one.

Robustness issues – Low robustness was a major obstacle to subject interaction in static studies. Their execution duration was higher due to spatial perception issues, especially with small buttons that some subjects were unable to interact with at all. In this study, these issues were not encountered. Furthermore, we added a third, smaller button scale which did not cause difficulties to any subject. Reduced standard deviation also suggests that the system was easier to apprehend as there were less disparities between subjects.

Relative Error

The data comparison of relative errors is displayed in figure 5.

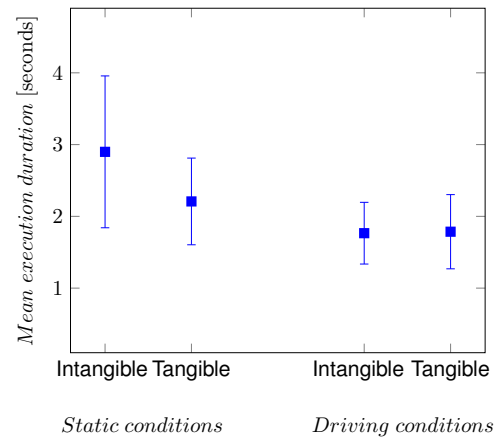


Figure 4: Mean execution duration difference between static and driving context for tangible and intangible systems.

Accuracy – Once more, the difficulties observed with the intangible interface in static mode seem to disappear in driving conditions. Whereas intangible haptics gave a poor performance in static mode, it nearly attains the same level of accuracy as tangible haptics in dynamic mode. Standard deviation is still significantly lower with the tangible system, which also benefited from driving conditions.

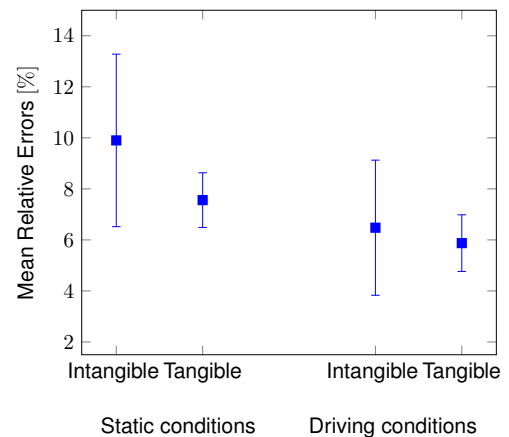


Figure 5: Mean relative error difference between static and driving context for tangible and intangible systems.

Subjects precision and disparities – Standard deviation of relative errors is illustrated in figure 6. Disparities were especially reduced in intangible mode, which provided the highest values. Tangible interactions had already provided low disparities in the static context and thus had less potential for progress, nevertheless performance was also improved.

Subject judgement

All subjects reported that they encountered no difficulties to interact while driving. Their interactions were successful with the smallest button scale, and they were surprised when told that subjects had difficulties with medium scales during static studies. A majority of the subjects reported that they preferred the intangible modality for various reasons :

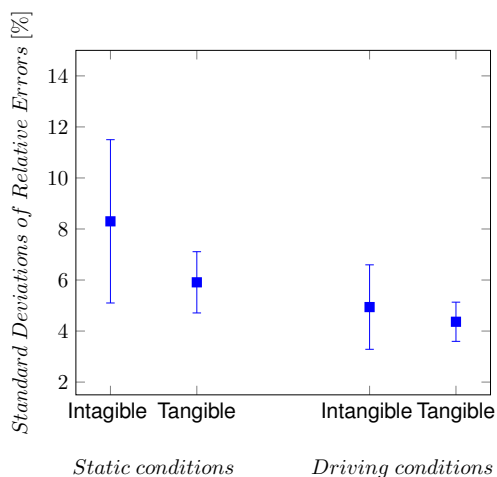


Figure 6: Mean standard deviations of relative errors.

- Easier setup : placing the glass on the right place could be difficult and had an important influence on the experience, therefore 2 to 5 minutes were needed for each subject.
- False-positives : when an interaction was failed with the tangible system, subjects felt a haptic feedback anyway. No wrong feedback was produced when the intangible system was used.
- Constraints : subjects were foreseeing future use-cases involving interactions with other non-flat pieces, which could not always be achieved with a transparent glass.

Discussion

Spatial perception

The main identified influence on performance is the quality of spatial perception, weakened by unreliable perceptual inputs. Inaccurate spatial perception brings inaccurate actions and a reduced confidence, which users encountered in a static context. Several parameters of this experiment led to an improved spatial perception.

Level of concentration on cues affects perception – The driving task forced subjects to continuously concentrate on their environment to prevent a crash, whereas they could keep their eyes on the HMI during static studies. Spatial cues are distributed inside the whole VE (objects of known size, parallax, stereoscopy, etc.) and are thus more easily perceived by subjects when they focus on them. Furthermore, these cues are continuously renewed as the car progresses, and they are seen from different points of view, in different layouts. Moving the head also adds parallax cues.

Shifts in visuo-haptic consistency – Morphologic disparities are often responsible for miscalculated vision frustrums. Most of the time, the software uses mean anthropometric data to interpolate the location of the eyes from the location of the tracked 3D glasses, causing inaccurate eye location data. These disparities are valued in millimeters but can become centimeters on the screen.

The subjective calibration used in this experiment

grants visuo-haptic consistency in the configuration of the calibration, when looking straight forward. However, while some subjects looked straight forward to interact, others kept their head toward the road and preferred moving only their eyes. Subjective methods are thus not satisfactory, although analytic methods are not without problems. In early experiments, we measured IPD without satisfactory visuo-haptic consistency. Further studies will try to improve this aspect by means of continuous recalibration.

Choosing the best tool for HMI design in VR

The added value of tangible interfaces was not probative in the driving simulation context, whereas it significantly improved interaction performance in the static context. The subjects were executing the exact same task and the only difference was the driving conditions. Therefore, the importance of the relationship between haptic modalities and use-cases/context must be emphasized. There exists no perfect haptic device for every use, but their individual advantages can be optimized for specific use-cases.

Active or passive scenario – Active and passive actions are handled differently by the brain, as studied by Mima et al. [Mim99]. Different areas and magnitudes are involved, inducing performance disparities, when subjects are acting or not.

- Haptic systems with poor performance should only be used in active scenarios to obtain satisfactory results.
- Haptic systems with assumed higher performance can be used in either active or passive scenarios.

Industrial specificities – The subjects' preferences may have been influenced by their affiliation to the automotive industry. Industrial projects induce additional constraints like non-intrusiveness, high robustness, and a focus on workability rather than realism. Since an interactive device is supposed to be used in a specific context when implemented in an industry, this context should be known with as much precision as possible before choosing a haptic device. Indeed, even a small parameter, like static or driving conditions, can have a significant influence.

Conclusions and implications

The comparison of tangible and fully virtual haptic systems for HMI studies brings new data on the contribution of haptic modalities in driving conditions. The respective performances of two haptic implementations, a sensory substitution-based intangible system and a tangible passive haptic system, were compared in driving simulations and static contexts by means of efficiency, accuracy and user satisfaction. Results show that subjects significantly improved their performance in driving conditions. Furthermore, the added value of tangible haptics was significantly lower in driving conditions. Our results bring evidence that the evaluation of haptic modalities has to be carried out in driving conditions, as their contribution may be very different in static conditions.

References

- J. E. Atkins, J. Fiser and R. A. Jacobs, **Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts**, *Vision Research*, vol. 41(4): 449–461, 2001.
- J. E. Atkins, R. A. Jacobs and D. C. Knill, **Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts**, *Vision Research*, vol. 43(25): 2603–2613, 2003.
- F. P. Brooks, **What's real about virtual reality?**, *IEEE Computer graphics and applications*, vol. 19(6): 16–27, 1999.
- J. Burge, A. R. Girshick and M. S. Banks, **Visual-Haptic Adaptation Is Determined by Relative Reliability**, *Journal of Neuroscience*, vol. 30(22): 7714–7721, 2010.
- A. S. Carlin, H. G. Hoffman and S. Weghorst, **Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of spider phobia: a case report**, *Behaviour Research and Therapy*, vol. 35(2): 153–158, 1997.
- L.-W. Chan, H.-S. Kao, M. Y. Chen, M.-S. Lee, J. Hsu and Y.-P. Hung, **Touching the void: direct-touch interaction for intangible displays**, 2625, ACM Press, 2010.
- J. E. Cutting and P. M. Vishton, **Perceiving Layout and Knowing Distances**, in *Perception of Space and Motion*, 69–117, Elsevier, 1995, ISBN 978-0-12-240530-3.
- N. A. Dodgson, **Variation and extrema of human interpupillary distance**, 36–46, 2004.
- M. O. Ernst and H. H. Bühlhoff, **Merging the senses into a robust percept**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8(4): 162–169, 2004.
- H. Hoffman, **Physically touching virtual objects using tactile augmentation enhances the realism of virtual environments**, 59–63, IEEE Comput. Soc., 1998.
- H. H. Hu, A. A. Gooch, W. B. Thompson, B. E. Smits, J. J. Rieser and P. Shirley, **Visual cues for imminent object contact in realistic virtual environment**, in *Proceedings of the conference on Visualization'00*, 179–185, IEEE Computer Society Press, 2000.
- B. E. Insko, **Passive haptics significantly enhances virtual environments**, Ph.D. thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.
- V. Interrante, B. Ries and L. Anderson, **Distance Perception in Immersive Virtual Environments, Revisited**, 3–10, IEEE, 2006, ISBN 978-1-4244-0224-3.
- A. Kemeny, **A cooperative driving simulator**, in *Proceedings of the International Training Equipment Conference (ITEC)*, 67–71, 1993.
- A. Kemeny and F. Panerai, **Evaluating perception in driving simulation experiments**, *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 7(1): 31–37, 2003.
- R. V. Kenyon, D. Sandin, R. C. Smith, R. Pawlicki and T. Defanti, **Size-Constancy in the CAVE**, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 16(2): 172–187, 2007.
- M. Kitagawa, D. Dokko, A. M. Okamura, B. T. Bethea and D. D. Yuh, **Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for surgical teleoperation**, *Studies in health technology and informatics*, 157–163, 2004.
- A. Lassagne, A. Kemeny, J. Posselt and F. Merienne, **Performance of different haptics systems for tactile dashboard HMI design in CAVEs**, *In Press*, 2017.
- J. M. Loomis, J. A. D. Silva, J. W. Philbeck and S. S. Fukusima, **Visual perception of location and distance**, *Current Directions in Psychological Science*, vol. 5(3): 72–77, 1996.
- C. Madison, W. Thompson, D. Kersten, P. Shirley and B. Smits, **Use of interreflection and shadow for surface contact**, *Perception & Psychophysics*, vol. 63(2): 187–194, 2001.
- T. Mima, **Brain structures related to active and passive finger movements in man**, *Brain*, vol. 122(10): 1989–1997, 1999.
- B. Petzold, M. F. Zaeh, B. Faerber, B. Deml, H. Egermeier, J. Schilp and S. Clarke, **A study on visual, auditory, and haptic feedback for assembly tasks**, *Presence: teleoperators and virtual environments*, vol. 13(1): 16–21, 2004.
- J. P. Wann, S. Rushton and M. Mon-Williams, **Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments**, *Vision Research*, vol. 35(19): 2731–2736, 1995.

“THEME ARTICLE”, “FEATURE ARTICLE”, or “COLUMN” goes here: The theme topic or column/department name goes after the colon.

Evaluation of spatial filtering algorithms for visual interactions in CAVEs

Antoine Lassagne
Renault – Arts & Métiers

Andras Kemeny
Renault – Arts & Métiers

Javier Posselt
Renault

Frédéric Merienne
Arts & Métiers

We present an approach to solving the problem of haptic and visual misalignment in CAVEs. The approach moves the collision box for the virtual screen’s buttons to coincide with where the user perceives their virtual location. Different filtering strategies were used. We evaluated the algorithms with simulations and with real subjects.

The recent improvements in high performance immersive systems, mostly achieved with enhancements in visual systems, bring a flow of new applications of virtual reality in the industry. At Renault, these new uses bring specific requirements in terms of interactions, as engineers aim to work on virtual car prototypes with their regular methods (transformations, explorations, measurements, cut planes, etc.) in immersive systems. However, strong visual/haptic mismatches prevent users from effectively using interaction modalities.¹ Due to these mismatches, the visual and the haptic workfield are not collocated and the users do not see what they touch where they touch. Hence, few interaction methods actually implemented in these systems.

In this paper, we evaluate the use of different filtering strategies meant to determine where the users try to touch buttons. The data collected allows the system to move the collision box of the buttons according to the previous interactions. Such a system would increase the precision of the user’s interactions and reduce their mistakes. We optimized several algorithms and performed an experiment to validate our findings.

RELATED WORK

Visual match

The CAVE itself has some particularities that must be considered when implementing the correct interaction modality. Unlike in head-mounted displays, the users see their own body (and hands) in a CAVE. This should be an advantage for natural interaction, but it is also a source of problems.

The event of a touch is binary whereas the visual perception of depth is continuous, it is hence important that visual and haptic contacts are matched. However, seeing objects too far or too close while touching them is a common complaint from CAVE's users. There are known causes, like the mismatch between the tracked 3D glasses that are used to calculate the frustrums from the eyes' point of view and the actual eyes. Different interpupillary distances, eye depths and nose heights lead to an offset between the theoretical and the real eyes, resulting in a different spatial perception between users.

It has also been established that distance and scale perception can be inaccurate in CAVEs, depending on the quantity of objects of known size, the photorealism of the scene, the quality of the visual system, and even the duration of the simulation⁵. The brain, lacking visual cues to get a robust spatial perception, can give unreliable information, resulting in drifts⁶. Research has shown that these drifts of human perception can be reduced with interaction, tasks and context⁷⁻⁸, but little is known about this topic as of yet.

These issues are significant, as there is a low probability that the users see their hand and the virtual point they want to touch at the same location⁹.

Interaction modalities

Cave Automatic Virtual Environment (CAVE) are immersive virtual reality systems where images are projected on the walls of a room-sized cube. Multiple researches evaluated different interaction systems in CAVEs. The key of an effective interaction is a relevant feedback which can be attained through software and/or hardware. Several experiments demonstrated that kinesthetic feedback,² cutaneous feedback³ and sensory substitution⁴ can all significantly enhance the interaction capabilities of virtual environments.

However, these modalities also have their own flaws, depending on their type: price, bulkiness, software/hardware compatibility, ergonomics, or even capabilities. Kinesthetic systems are especially expansive and unhandy. Sensory substitution is the easiest solution to implement, as it only requires a software solution and a tracking system. It does not prevent users from passing through objects. Nevertheless, visual cues and sounds can be relevant and help people in their interactions. This study is focused on sensory substitution for its higher compatibility with CAVEs and its flexible usage.

Existing solutions

There exists a few methods to handle the mismatch between the haptic and the visual workspace, like the Clutching, Scaling and Bubble interaction techniques¹⁰. However, these methods are often designed to enlarge the range of interaction devices, not to collocate the haptic and the visual workspace.

A lot of CAVEs do not handle visual drift. They settle for inaccurate interactions, no interactions at all, or interactions with a virtual tool. Virtual tools, displayed by the CAVE, encounter the same drift as the rest of the virtual environment. They are thus easier to interact with, as users easily immerse themselves into avatars not sharing the same location (computer mice are a good example), and interactions are efficient with them¹¹⁻¹².

In other fields, there exist solutions to improve the performance of inaccurate interactions. For example, the patent FR3028968B1 describes a car HMI (Human-Machine Interface) system which predicts the intention of users to ease their interactions by moving the buttons. Likewise, developers of smartphones' virtual keyboards use tricks to improve performance: although the process is invisible, the size of keys are changing after every tap, on the grounds of probabilities and known dictionaries.

These two solutions are transparently changing the collision boxes of the buttons to adapt to the user's errors, and this is what we aim to reproduce in CAVEs.

OBJECTIVES AND HYPOTHESIS

Scope of this study

The HMI designers of car dashboard touchscreen software currently test their creations on desktop tablets. They should be able to evaluate them easily in driving conditions, in the correct vehicle, without building a new prototype every time. Virtual reality offers the flexibility and convenience that they seek, on the condition that the interaction modalities reach sufficient performance and reliability.

This research is the third part of a series of studies carried out to evaluate the performance of interactions in CAVEs for HMI design purposes⁶⁻⁷. The interactions are limited to a bi-dimensional plane representing the dashboard touchscreen of a virtual car. Handling only two dimensions allows easier design and evaluation of the interaction system, before porting it to tri-dimensional use-cases.

We aim to reduce the visual mismatch discussed earlier, as it is often responsible for the poor interaction experience. Following the example of what exists in other fields that also encounter interaction performance issues, we wish to implement an algorithm which can shift the collision box of buttons depending on the drift of the user. Natural interactions with the hand are targeted, as these interactions are desired in industrial usage and they face significant mismatch between the virtual objects and the user's hand.

Hypothesis

Two major hypotheses are assumed in this experiment.

- We assume that the users unconsciously try to reach the center of the buttons when touching them¹³. In this experiment, subjects were specifically instructed to hit the center of the buttons to make sure that the study would not be biased.
- On the basis of other studies and observations, we assume that there are two kinds of spatial drifts encountered by users.
 - A systemic offset, mainly due to morphologic disparities and system imperfections, depending on the system, the point of view, and posture⁵.
 - An uncertainty offset, due to the brain lacking robust perception cues¹⁴.

Hence the algorithm has to handle both offsets as well as possible.

BUILDING THE ALGORITHM

How it should operate

In technical terms, the algorithm is supposed to move the collision box of the buttons to make it coincide with what the user sees. For example, if a user perceives a button too much on the right compared to the model, the collision box moves to the right, as represented in figure 1.

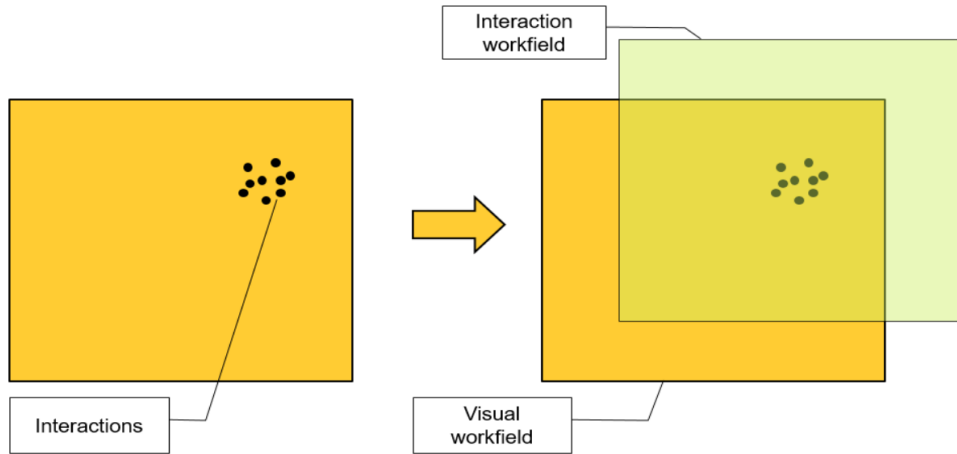


Figure 1. The collision box of the button is moving regardless of its visual.

The global mechanics of this system require specifications to define the behavior of the algorithm with more precision.

- The visual representation must never move, and the operation is invisible for the user.
- The collision box cannot go too far from its initial position to keep it from being lost.
- The operation must compute in real time.
- The operation must significantly enhance the performance of the interactions and be appreciated by the users.
- The operation must take into account human error.

Different algorithms

Different strategies were implemented for testing purposes. For each solution, (x_i, y_i) represents the coordinates of the center of the collision box and (x, y) represents the coordinates of the last interaction.

1. Linear filtering – The simplest method, following a linear equation (1).

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + K(x - x_i) \\ y_{i+1} = y_i + K(y - y_i) \end{cases} \quad (1)$$

2. Quadratic filtering – Not much more complicated, but a different behavior (2).

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + K * \sqrt[3]{(x - x_i)} \\ y_{i+1} = y_i + K * \sqrt[3]{(y - y_i)} \end{cases} \quad (2)$$

3. Mobile means filtering – This kind of filtering takes more interactions into account, to handle human errors more smoothly (3).

$$\begin{cases} x_{i+1} = \frac{\sum_{k=i-m+1}^i (K_k * x_k)}{m} \\ y_{i+1} = \frac{\sum_{k=i-m+1}^i (K_k * y_k)}{m} \end{cases} \quad \text{a.} \quad (3)$$

4. Fuzzy logic filtering – A complex algorithm intended to adapt quickly and handle human errors¹⁵.
5. PID regulators¹⁶ and Kalman filters¹⁷ were considered, but these are adapted to dynamic use cases, whereas our interfaces are not moving within the environment.

The fuzzy logic algorithm

As it provided the best results in simulations (described further), the fuzzy logic algorithm needs more details. It is built on additional specifications:

- It must take into account the past successes and errors from the users.
- It must not consider one isolated missed interaction. One cannot remain focused all the time and to err is human.
- It must rapidly correct if the user suddenly drifts.

To respond to these inquiries, we set up 4 linguistic variables.

- The proximity to the last interaction (A, [-100, 100], {Near, Medium, Far}).
- The proximity to the last weighted mobile mean (B, [-100, 100], {Near, Medium, Far}).
- The correction wanted relative to the last interaction (X, [0, 100], {Low, Medium, High}).
- The correction wanted relative to the last weighted mobile mean (Y, [0, 100], {Low, Medium, High}).

The fuzzy membership functions are gaussian functions represented in figure 2. Their sum is 1 all along [-100,100], their parameters are fixed to $\mu = 50$ and $\sigma = 15$.

We use Zadeh operators as fuzzy operators, a common replacement of basic operators. The fuzzy output function f_z depends on the membership of one interaction in the linguistic sets A and B.

f_z is the final function, the sum of normalized partial functions (see Equation 4). The 6 partial functions lead to 6 linear corrections (with gains K_i), getting closer to the last interaction and the weighted mobile mean. The algorithm is thus also subject to the adjustments of the gains of each partial function.

$$f_z = \sum_i f_z(X_i) + \sum_i f_z(Y_i) \quad (4)$$

The matrix of decisions, defined in equations 5 and 6, is arbitrary and is the key to achieve our objectives. For example, if the current interaction is far from the last one but near the mobile mean, the partial function $f_z(Y_2) \in (A_2 \cap B_0)$ is predominant.

$$\begin{cases} f_z(X_0) \in (A_0 \cap B_0) \cup (A_1 \cap B_0) \cup (A_2 \cap B_0) \\ f_z(X_1) \in (A_0 \cap B_1) \cup (A_1 \cap B_1) \\ f_z(X_2) \in (A_0 \cap B_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_z(Y_0) \in (A_0 \cap B_0) \cup (A_0 \cap B_1) \cup (A_0 \cap B_2) \\ f_z(Y_1) \in (A_1 \cap B_0) \cup (A_1 \cap B_1) \\ f_z(Y_2) \in (A_2 \cap B_0) \end{cases} \quad (6)$$

The more an interaction belongs to the fuzzy sets ruling a partial function (following the gaussians laws), the more the gain of the partial function (7) will grow.

$$f_z(X_i)(x) = K_i(x, y) * x \quad (7)$$

$K_i(x, y)$ depends on the membership in the fuzzy sets defined in the matrix of decisions.

In less technical terms

Whenever a subject interacts, his interaction coordinates are compared with his previous interaction coordinates and with the coordinates of the weighted mean of his 5 previous interactions. The gaussian functions of Figure 2 are applied to determine the degree of membership of the mobile mean and the last interaction in near, medium and far fuzzy sets. We apply the rules of the matrix of decisions to obtain the partial f_z functions. Finally, we sum and multiply the partial

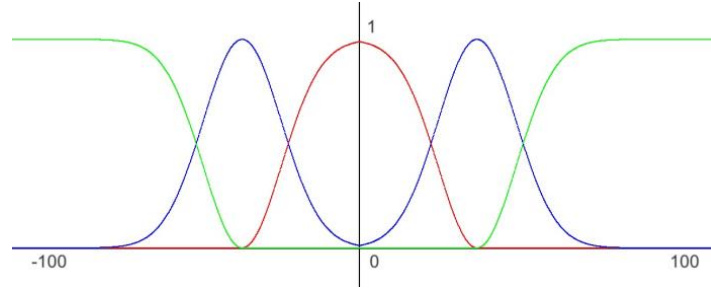


Figure 2. Standard gaussian functions of fuzzy sets. The centered red function is for Near/Low sets, the blue one is for Medium set, and the fringe green function is for Far/High sets. The equations are $f(t) = \exp \frac{-1}{2} (\frac{t-\mu}{\sigma})^2$

functions and their gains to obtain the final function which drives the movement of the collision boxes.

Adding some constraints

In theory, this algorithm can make the collision boxes drift indefinitely. Previous research has shown that the spatial perception of users can drift but can also suddenly return to a previous state. Our system might not be prepared for such a situation. To prevent this, we tested two types of constraint systems.

- A binary constraint algorithm, preventing the algorithm from placing the collision boxes further than a certain value.
- A linear constraint algorithm, diminishing the action of the algorithm past a certain value. The linear constraint decreases a gain K from 1 to 0 when the collision box is moved away from 50% to 100% of its size.

The algorithm should also prevent collision boxes overlaps. In our algorithm, all collision boxes move the same distance at the same time. It prevents overlap and it allows the system to use data from all the buttons and be efficient faster.

Testing through resimulation

The data of 30 subjects touching series of buttons, collected from previous experiments, was used to evaluate and adjust the algorithms. We ran simulations where the algorithms were applied on their interactions, with specific strategies and sets of parameters. Running these operations before an actual experiment allowed the reproduction of what subjects did thousands of times, to test hundreds of sets of parameters. Two indicators were considered, the relative error of the interaction (between -50 and +50) and the number of missed interactions.

- Linear filtering, as simple as it is, already provides decent results. For $K \in [0.2, 0.4]$, the relative error of interactions is diminished by more than 10%. Nevertheless, there are two major drawbacks.
 - It does not take into account that no user accurately hits the center every time. It overreacts when the user misses the center from time to time.
 - It does not keep any data about previous interactions, it does not learn from repetition.
- Quadratic filtering is a slight enhancement, but it inherits the same drawbacks as linear filtering. The best performance was achieved with $(K, a) = [1.2, 0.4]$.
- Weighted mobile means provide better results. After adjusting the parameters, the relative error is reduced by almost 15%. We adjusted not only the size of the mobile mean, but also the weight of each iteration. We observed that 4 or 5 iterations provides the best results, and the optimal weights are $\{3, 2.5, 2.5, 2.5, 2.5\}$ for the iterations $\{n-1, n-2, n-3, n-4, n-5\}$. However, there are still many missed interactions.

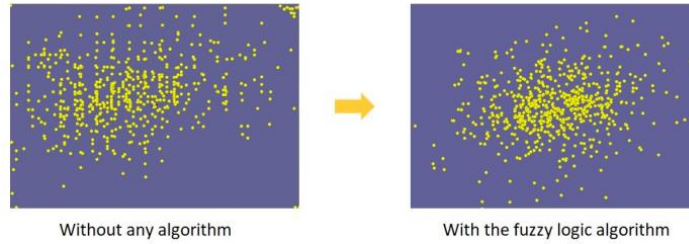


Figure 3. Repartition of interactions with and without optimized fuzzy logic algorithm. The point cloud is tighter on the right picture. The interactions failed by subjects during the recording could not be tested with the algorithm (as they were not recorded), but it is possible they could have been succeeded with it.

-
- Fuzzy logic provides the best results with relative errors decreased by nearly 25% in simulations. Figure 3 shows the repartition of interactions on the buttons, with and without the algorithm. A lot of optimizations were required to achieve this result and the following values were found for the K_i gains.

$$\begin{cases} K_0 = 0.215 \\ K_1 = 0.41 \\ K_2 = 0.69 \end{cases}$$

These values may be too precise for us, as too much optimization would make the algorithm data dependent. Therefore, it needs to be tested with new subjects.

- The binary constraint system worsened the performance, whereas the linear constraint reduces the number of errors without degrading the performance.

Thanks to their best combines results, we chose to implement the fuzzy logic algorithm, associated with the linear constraints, into a virtual HMI. This implementation aims to evaluate this method with new subjects and data.

VALIDATION OF THE ALGORITHM

The data used in resimulations is incomplete, as no coordinates were collected about failed interactions during the recordings. Thus, we cannot know yet if our system could have turned a failed interaction into a successful one. Therefore, we conducted an experiment to compare the performance of real subjects with and without the algorithm.

Materials and methods

This experiment took place in Renault P3I (Industrial Immersive Integration Platform) CAVE, a 4-sided virtual reality room powered by ultra-short throw full HD Panasonic projectors. It provided active stereoscopy, optical tracking with A.R.T. infrared technologies, and a 3-finger tracked glove to acquire interactions. The virtual scene was displayed by Oktal SCANeR Studio¹⁸ and placed the subjects inside a virtual car. A custom software was displayed on their dashboard touchscreen (see Figure 4). Sensory substitution was rendered on the touchscreen whose virtual buttons would change their color when touched.

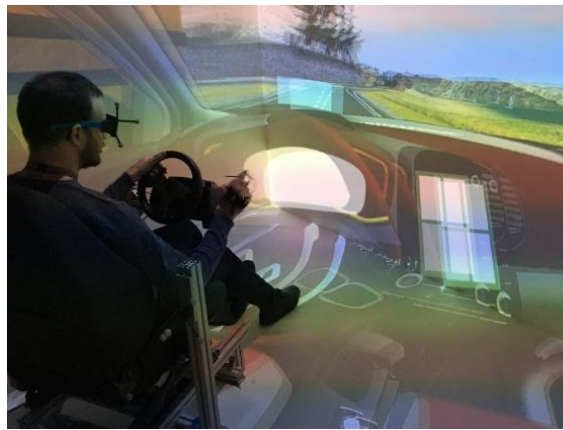


Figure 4. A subject is interacting with the virtual dashboard touchscreen.

15 subjects took part in this experiment. Each one of them is a Renault employee to observe confidentiality restrictions. Males and females, most of them were between 25 and 50 years old. Their specificities were known by the questionnaires, oral questions, and verbatim records. Their feelings were collected in the end via a questionnaire.

The subjects were instructed to touch the buttons in the center as they were turned green. Each subject achieved 6 series of interactions: 3 different scales, with and without the algorithm, in a random order. Altogether, they achieved 120 interactions. A first serie was always proceeded with the largest scale to allow the subjects to grasp their task.

A subjective calibration was used to initialize the space of the tracking system and to reach an approximative setup. It allowed subjects to succeed in their first interactions, hence giving initialization data to the filtering algorithm. The subjective calibration consists of three interactions on 3 corners of the screen. The tracking system can then map the calculated plane with the collision coordinates of the dashboard touchscreen, as represented in Figure 5.

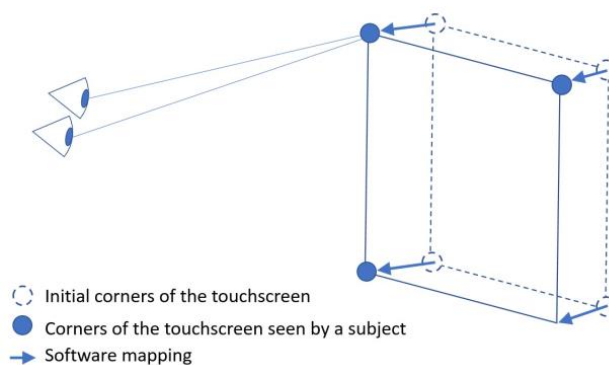


Fig. 5. The collision coordinates of the dashboard touchscreen is mapped with the perceived location of the image during the initial subjective calibration.

Results

We measured the relative error of subjects, meaning the distance between the center of the virtual button and the interaction of the subject, relative to the size of the button. The relative error is in the range of -50 to 50.

Statistics

The results are paired samples, as every subject manipulated the interface with and without the algorithm. According to the Shapiro-Wilk Test, the repartition of the data is normal. We hence used the Student's T-test for paired samples to evaluate the degree of significance of our results and obtained a p-value inferior to 0.001 ($t - value = 4.56$, $df = 14$).

Relative error

Relative error is represented in Figure 6. According to these results, interactions are significantly more accurate with the filtering algorithm. Indeed, the mean relative error of the subjects was reduced by 30% on average, even more than how much the simulations predicted. The filtering system allowed subjects to succeed some interactions that they would have failed otherwise by touching outside of the original collision box.

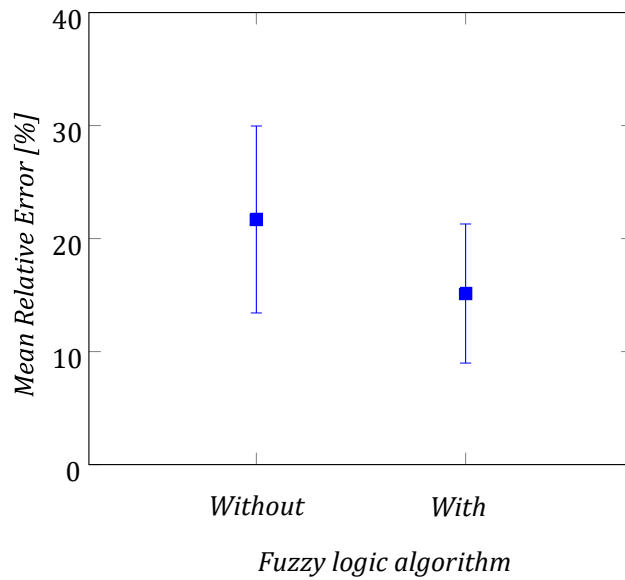


Fig. 6. Mean relative error of subjects without and with the fuzzy logic algorithm. The error bars represent the standard deviation.

Static error

During the experiment, the operator could see both the haptic and visual workspaces. He observed that most subjects encountered a heavy constant error which allowed the algorithm to be this effective. However, the algorithm needed a few (3 to 5) interactions before being totally operative.

Satisfaction of subjects

The subjects answered to a questionnaire in the end of the experiment. This questionnaire, built for the purpose of the experiment, contained the questions of table 1. Every question received two answers, corresponding to filtered/ not filtered situations.

Question	Text
1	Did you have difficulty interacting?
2	Were you hampered while interacting?
3	Do you think you succeeded touching the center of the buttons?
4	Were you as fast as you wanted?
5	Did your vision and your interactions feel spatially consistent?
6	How much delay did you experience between your actions and expected outcomes?
7	How proficient in interacting did you feel at the end of the experience?

Table 1. Content of the questionnaire

According Figure to this questionnaire, all the subjects felt more confident in their interactions with the filtering algorithm, although half of them reported that they had trouble evaluating the depth of the touchscreen. Indeed, this system improved their performance but not their visual perception. Some of them reported that they would have appreciated a tangible haptic feedback to get a stronger depth mark.

DISCUSSION & IMPLICATIONS

These results show that such a method is relevant to improve the performance of interactions in CAVEs. However, the strategy and set of parameters used is specific to the use-case, although the fuzzy logic strategy is flexible and adaptable to many situations.

The level of performance attained is sufficient for HMI engineering, and further implementations will focus more on the industrial aspects of the simulation (repeatability, time consumption, etc.).

Drift of spatial perception

The hypothesis of spatial perception drift is confirmed by the fact that this algorithm worked successfully. The data is in accordance with this assumption, as it shows that each user encountered a floating drift, slightly changing throughout the experiment. However, we cannot be certain to know all the reasons for this. We know that there is an actual offset due to morphologic disparities and system imperfections, but there are other sources, like the uncertainty drift discussed earlier. The floating perception proves that we do not understand everything that happens in virtual environments as of yet.

What if it fails

Moving the collision boxes of the buttons is not without drawbacks. If some subject drifts too much and suddenly recalibrates his perception, he or she may fail his next interaction. The constraints factor added in the algorithm prevents the subjects from drifting too far, and thus prevent them failing interactions if their perception goes back to a previous state. However, a quick recalibration method should be implemented to secure any remaining failures. It can use gesture recognition to detect whenever users are attempting (and failing) to interact and offer them to proceed with a fast subjective recalibration. The recalibration would involve a few interactions on a dedicated 3D interface for the algorithm to be operative again.

Generalization

This method is specific to pressing virtual buttons on a flat surface and is not ready for another use. However, using fuzzy logic (or even simpler algorithms) to filter the interactions of the users should be generalized. Further studies will focus on finding generic sets of parameters which may allow the method to be compatible with more use-cases. More issues will also need dedicated studies:

- How can the filtering data collected from a button in one position and orientation can be used for a second button in another position and orientation?
- How can the filtering include the third dimension (depth)?
- How can the method take the position and orientation of the head in account? How can eye tracking improve our issues?

These issues are difficult to handle for now, as the system does not tackle the root causes. Instead of moving the collision engine which is supposed to be accurate, it should move the images which actually are the real issues.

To achieve this, a similar algorithm could move the virtual eyes instead of the collision engine, following the equations of fig. 7 and 8. However, to prevent users from becoming completely

lost, the environment must not move after each interaction, therefore this kind of algorithm needs to make its move only rarely. Each interaction can add a contribution to the location of the eyes, but the system cannot proceed with the correction too often, thereby making real time filtering impossible.

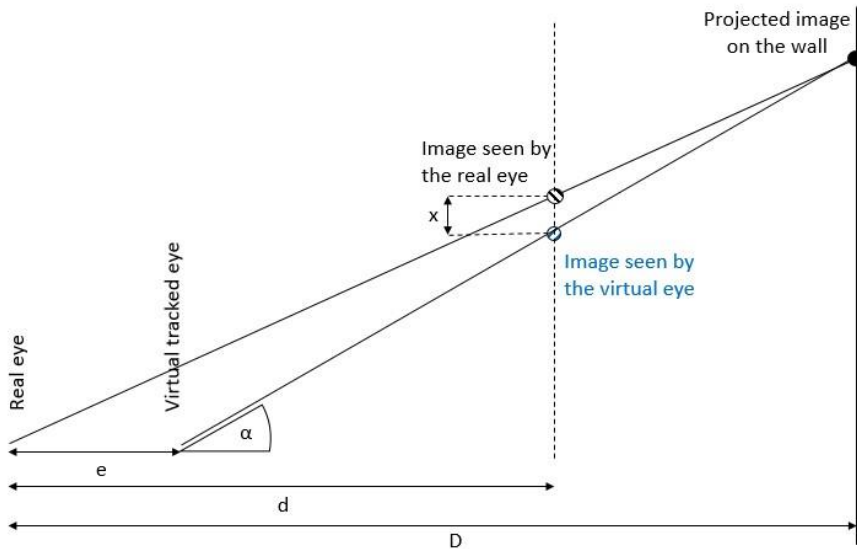


Fig. 7. Quantitative influence of eye depth difference. The relation between the measured offset and the eye depth is

$$x = \frac{(D-e-d)}{D-e} * \frac{2 * e^2 * a}{e^2 + a^2 - (\frac{D-e}{\cos \alpha})^2}$$

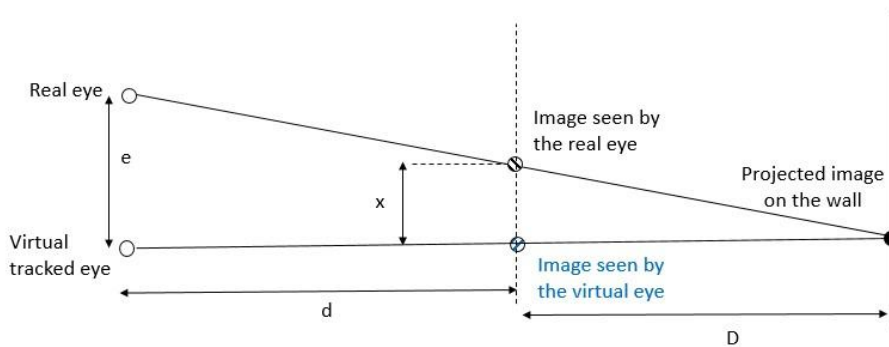


Fig. 8. Quantitative influence of eye height difference. The relation between the measured offset and the eye height is

$$x = e * \frac{d}{d+D}$$

Nevertheless, such an algorithm may serve the calibration purpose, acting as a visual calibration system for any simulation involving CAVE-like technologies and interactions. It can be fast, user-friendly and without any storing of confidential data (like morphology). Users would only need to proceed with a few specific interactions and the algorithm would interpret where their eyes are, based on geometry formulas related to independent degrees of freedoms of the eyes (eye height, eye depth, interpupillary distance).

It could be used simultaneously with a real-time filtering to reduce the dynamic errors, as it would only provide a correction to static ones. Of course, we need further studies to evaluate a protocol that can set-up such a calibration with a sufficient accuracy.

CONCLUSION

In this study, we tried to filter subjects' interactions to solve the mismatch between the haptic and the visual workspace in CAVEs. We aimed to improve the performance of interactions for HMI virtual engineering. Instead of moving the visual side of the simulation, we built an algorithm which moves the collision boxes of the buttons depending on where the subjects seem to see the buttons. After testing different strategies, we implemented a fuzzy logic algorithm for an actual experiment with 15 subjects and it provided significant performance improvements to their interactions. Our findings offer a better understanding of the nature of visual perception drift and solutions to counterbalance it.

Perspectives

Other studies are needed to make this concept generalizable to more interfaces. We plan to build generic sets of parameters and to make the system handle the whole virtual workspace.

These results will lead to the design of a similar algorithm to implement a low-level calibration: by moving directly the virtual eyes instead of the haptic work field, we plan to reduce the systematic error.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by a cooperation between Renault Group and Arts et Métiers Engineering School. We would like to thank in particular Renault Group for providing the materials and software we used in this experiment.

REFERENCES

1. K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, "Survey - Haptic rendering: introductory concepts," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 24–32, Mar. 2004.
2. B. Hannaford and L. Wood, "Performance evaluation of a 6 axis high fidelity generalized force reflecting teleoperator," 1989.
3. P. Galambos, "Vibrotactile feedback for haptics and telemanipulation: Survey, concept and experiment," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 9, no. 1, pp. 41–65, 2012.
4. M. Kitagawa, D. Dokko, A. M. Okamura, B. T. Bethea, and D. D. Yuh, "Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for surgical teleoperation," *Studies in health technology and informatics*, pp. 157–163, 2004.
5. R. V. Kenyon, M. Phenany, D. Sandin, and T. Defanti, "Accommodation and size-constancy of virtual objects," *Annals of biomedical engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 342–348, 2008.
6. A. Lassagne, A. Kemeny, J. Posselt, and F. Merienne, "Performance evaluation of passive haptic feedback for tactile HMI design in CAVEs," *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 1–1, 2017.
7. ———, "Comparing Tangible and Fully Virtual Haptic Systems for HMI Studies in Simulated Driving Situations," Stuttgart, Sep. 2017.
8. A. R. Richardson and D. Waller, "Interaction with an immersive virtual environment corrects users' distance estimates," *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 49, no. 3, pp. 507–517, 2007.

9. A. Sutcliffe, B. Gault, T. Fernando, and K. Tan, "Investigating interaction in CAVE virtual environments," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, vol. 13, no. 2, pp. 235–267, 2006.
10. L. Dominjon, A. Lécuyer, J.-M. Burkhardt, and S. Richir, "A Comparison of Three Techniques to Interact in Large Virtual Environments Using Haptic Devices with Limited Workspace," in *Advances in Computer Graphics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, vol. 4035, pp. 288–299.
11. F. Pavani, C. Spence, and J. Driver, "Visual capture of touch: Out-of-the-body experiences with rubber gloves," *Psychological science*, vol. 11, no. 5, pp. 353–359, 2000.
12. B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger, and O. Blanke, "Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness," *Science*, vol. 317, no. 5841, pp. 1096–1099, Aug. 2007.
13. F. Wang and X. Ren, "Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction." *ACM Press*, 2009, p. 1063. [Online]. Available:
14. M. O. Ernst and H. H. Bühlhoff, "Merging the senses into a robust percept," *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 162–169, Apr. 2004.
15. G. Klir and B. Yuan, *Fuzzy sets and fuzzy logic*. Prentice hall New Jersey, 1995, vol. 4.
16. K. J. Aström and T. Hägglund, *PID controllers: theory, design, and tuning*. Isa Research Triangle Park, NC, 1995, vol. 2.
17. R. E. Kalman and others, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
18. A. Kemeny, "A cooperative driving simulator," in *Proceedings of the International Training Equipment Conference (ITEC)*, 1993, pp. 67–71.

ABOUT THE AUTHORS

Antoine Lassagne received a Master in Engineering from Arts et Métiers, Paris in 2015. He is currently working on a PhD with the Laboratory of Immersive Visualization and with Renault Group. He is interested in haptic rendering and virtual reality.

Pr. Andras Kemeny is the Director of the Laboratory of Immersive Visualization, a joint Renault - Arts et Métiers ParisTech research laboratory. He has initiated and directed the development of a driving simulation software package, SCANeR Studio, a worldwide leader and a major development and assessment driver in the loop (DIL) simulation tool for Automotive Driver Assistance Systems (ADAS), Human Machine Interfaces (HMI), autonomous and connected vehicles, deployed at a large number of automotive OEMs, suppliers and research laboratories. Pr. Kemeny is also Associate Professor at Arts et Métiers ParisTech and author of more than 150 scientific and technical papers and book chapters as well as several industrial patents and software copyrights.

Javier Posselt is member of Renault's Autonomous Driving Simulation & Virtual Reality department since 2010 as project manager in Virtual and Mixed reality systems. He received his PhD in robotics on 1996 at Université Pierre et Marie Curie. For 15 years, he is project manager on projects involving industrial process simulation (virtual factory), and digital mockup assessment using virtual and mixed reality systems. He managed French national and international collaborative projects in the area of virtual reality. He was project manager of the first high quality projection CAVE of Renault in operation since 2013.

Pr. Frederic Merienne is currently professor at Arts et Métiers and director of the Image Institute, a research team of the Le2i Laboratory, since 2004. He received his PhD in 1996 at the National Polytechnical Institute of Grenoble (INPG). His research interests are focused on virtual immersion linked with engineering, cultural heritage and health applications. He is the author of many scientific papers in virtual reality and related disciplines. He is involved in different projects with industrial partners and initiated international

collaborative projects in the area of virtual reality with universities in the USA, Australia, Colombia and Malaysia.

REVENDEICATIONS

1. Système de sélection (30) dans un environnement virtuel immersif (11), comprenant :

5 -un système d'affichage (17) en 3D apte à afficher un élément graphique de sélection dans une région d'une surface virtuelle de commande,

-un système de localisation (18) et de détection des mouvements de la tête d'un utilisateur et d'un moyen de pointage (22) tenu par ledit utilisateur,

10 ledit système de sélection (30) comprenant une interface apte à détecter l'approche et la position du moyen de pointage par rapport à ladite surface virtuelle de commande pour atteindre une zone de sélection (33) d'un élément graphique de sélection (31),

15 caractérisé en ce que l'interface est apte à modifier la zone de sélection (33) de l'élément de sélection (31) en gardant l'affichage dudit élément (31) figé, quand la position d'impact (35) du moyen de pointage (22) avec l'élément de sélection sur la surface de commande diffère d'une position efficace (36) de la zone de sélection d'un écart inférieur à un seuil.

20 2. Système de sélection (30) selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'interface déplace la position efficace (36) de sélection de l'élément de sélection.

3. Système de sélection (30) selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'interface est apte à modifier la position efficace (36) de la zone de sélection (33) de l'élément graphique selon les positions des N derniers pointages de l'élément de sélection (31).

25 4. Système de sélection (30) selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'interface évalue la cohérence entre la moyenne des N-1 avant-dernières positions de pointage avec la dernière position (35) de pointage.

5. Système de sélection (30) selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'interface de sélection définit la nouvelle position efficace de la zone de

sélection de l'élément sélectionné en fonction de la moyenne des positions des N-J avant-dernières positions de pointage (35) et des J dernières positions de pointage (35).

5 6. Système de sélection (30) selon l'une quelconque des revendications 3 à 5, caractérisé en ce que le nombre N des derniers pointages du même élément de sélection (31) est supérieur ou égal à 5.

7. Système de sélection (30) selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que la zone de sélection (33) est centrée sur la position efficace (36).

10 8. Système de sélection (30) selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le moyen de pointage (22) est un élément de suivi (20) tenu à l'extrémité d'un doigt de l'utilisateur.

ABREGE

Système de sélection (30) dans un environnement virtuel immersif (11), comprenant :

- 5 -un système d'affichage (17) en 3D apte à afficher un élément graphique de sélection dans une région d'une surface virtuelle de commande,
- un système de localisation (18) et de détection des mouvements de la tête d'un utilisateur et d'un moyen de pointage (22) tenu par ledit utilisateur,
- ledit système de sélection (30) comprenant une interface apte à détecter
- 10 l'approche et la position du moyen de pointage par rapport à ladite surface virtuelle de commande pour atteindre une zone de sélection (33) d'un élément graphique de sélection (31),
- caractérisé en ce que l'interface est apte à modifier la zone de sélection de l'élément de sélection (31) en gardant l'affichage dudit élément (31) figé, quand
- 15 la position d'impact du moyen de pointage (22) avec l'élément de sélection sur la surface de commande diffère d'une position efficace de la zone de sélection d'un écart inférieur à un seuil.

Annexe : **Fig. 1**

RETOUR SENSORIEL DU TOUCHER DANS DES ENVIRONNEMENTS VIRTUELS

RESUME :

Ce projet de thèse de doctorat traite du retour sensoriel du toucher dans des environnements virtuels. La partie théorique s'intéresse aux différents schémas de perception du toucher et aux modalités haptiques correspondantes. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur la pertinence de chaque modalité pour chaque usage, à leur compatibilité avec les systèmes visuels qui ont une place très importante en réalité virtuelle, ainsi qu'aux réponses aux problématiques visuelles inhérentes à chaque cas. Ces réflexions nous ont amenés à évaluer les méthodes d'haptique passive et de substitution sensorielle dans le cadre d'interactions dans des CAVEs. Les résultats mettent en lumière l'importance du choix de la modalité en parallèle avec celle de la construction du scénario, mais aussi les difficultés à colocaliser les moteurs haptiques et visuels. Les interactions peuvent souffrir de performances insuffisantes si des précautions ne sont pas prises. Enfin, nous avons testé quelques méthodes logicielles visant à améliorer les performances des sujets lorsqu'ils interagissent.

Mots clés : Réalité virtuelle, Haptique, Interactions.

HAPTIC AND INTERACTION FEEDBACKS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS

ABSTRACT :

This thesis tackles the subject of the feedbacks of interactions in virtual environments. The theoretical part addresses the different perception schemes and the corresponding haptic modalities. We especially focused on the relevance of each modality for each use-case, on the compatibility with the visual systems which take an important place in virtual reality, and on the problematics of each situation. These studies led us to evaluate passive haptics and sensory substitution for interactions in CAVEs. The results show the importance of choosing the right modality relative to the scenario design. We also evaluated how mismatched the visual and haptic workfield can be, and how the performance of interactions suffers from this fact. Ultimately, we tested a few software-based methods meant to improve the performance of the interactions of the subjects.

Keywords : Virtual Reality, Haptics, Interactions

