



HAL
open science

Plate-forme de réalité virtuelle pour l'étude de l'accessibilité et de l'extraction de lampes sur prototype virtuel automobile

Damien Chamaret

► **To cite this version:**

Damien Chamaret. Plate-forme de réalité virtuelle pour l'étude de l'accessibilité et de l'extraction de lampes sur prototype virtuel automobile. Informatique [cs]. Université d'Angers, 2010. Français. NNT: . tel-00540899

HAL Id: tel-00540899

<https://theses.hal.science/tel-00540899>

Submitted on 29 Nov 2010

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.

**Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés
EA 4094**

Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers
62, Avenue Notre Dame du Lac 49000 ANGERS

UNIVERSITÉ D'ANGERS

N° Ordre : 995

**Plate-forme de réalité virtuelle pour l'étude de
l'accessibilité et de l'extraction de lampes
sur prototype virtuel automobile.**

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Automatique et Informatique Appliquée

ÉCOLE DOCTORALE STIM

Présentée et soutenue

le : 2 juin 2010

à : Angers

par : Damien CHAMARET

Devant le jury ci-dessous :

| | | |
|-------------------------------|--|--------------|
| Mr Frédéric Mérienne, | Professeur à l'Université de Bourgogne | Rapporteur |
| Mr Patrick Millot, | Professeur à l'Université de Valenciennes | Rapporteur |
| Mr Jean-Louis Ferrier, | Professeur à l'Université d'Angers | Directeur |
| Mr Paul Richard, | Maître de Conférences à l'Université d'Angers | Co-encadrant |
| Mr Jérôme Grosjean, | Maître de Conférences à l'Université de Strasbourg | Examineur |
| Mr Malik Mallem, | Professeur à l'Université d'Evry | Examineur |
| Mr Sébastien Denis, | Valeo Lighting Systems Angers | Invité |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | 7 |
| Introduction | 9 |
| 1 Prototypage et exigences de l'interaction en EV | 13 |
| 1.1 Introduction | 13 |
| 1.2 Le prototypage | 13 |
| 1.2.1 Définition et classification | 13 |
| 1.2.2 Prototypage virtuel versus réel | 16 |
| 1.2.2.1 Prototypage réel : limites et contraintes | 16 |
| 1.2.2.2 Prototypage virtuel : intérêts et limitations | 17 |
| 1.3 Exigences de l'interaction en EV | 19 |
| 1.3.1 Interaction visuelle | 19 |
| 1.3.1.1 Exigences physiologiques | 20 |
| 1.3.1.2 Perception de la profondeur | 23 |
| 1.3.1.3 Contrôle des mouvements | 25 |
| 1.3.2 Interaction haptique | 26 |
| 1.3.2.1 Exigences physiologiques | 27 |
| 1.3.2.2 Perception haptique | 28 |
| 1.3.3 Interaction multimodale | 30 |
| 1.3.3.1 Intégration visuo-haptique | 30 |
| 1.3.3.2 Apports du retour haptique | 32 |
| 1.3.3.3 Substitution sensorielle | 32 |
| 1.4 Conclusion | 34 |
| 2 Interfaces et environnements visuo-haptiques | 37 |
| 2.1 Introduction | 37 |
| 2.2 Interfaces visuelles | 37 |
| 2.2.1 Configurations immersives | 38 |
| 2.2.1.1 Les murs | 38 |
| 2.2.1.2 Les dômes | 39 |
| 2.2.1.3 Les salles | 39 |
| 2.2.1.4 Les plans de travail | 39 |
| 2.2.1.5 Les visiocubes | 39 |
| 2.2.1.6 Les visio-casques | 40 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.2.2 | Configurations non-immersives | 41 |
| 2.3 | Interfaces haptiques | 42 |
| 2.3.1 | Interfaces à retour d'effort | 43 |
| 2.3.2 | Classification | 43 |
| 2.3.2.1 | Interfaces à réaction externe | 45 |
| 2.3.2.2 | Interfaces à réaction interne | 48 |
| 2.3.3 | Interfaces à retour tactile | 51 |
| 2.3.3.1 | Interfaces pneumatiques | 51 |
| 2.3.3.2 | Interfaces vibro-tactiles | 52 |
| 2.3.3.3 | Interfaces électro-tactiles | 54 |
| 2.3.3.4 | Interfaces à retour thermique | 54 |
| 2.4 | Configurations visuo-haptiques | 54 |
| 2.4.1 | Configurations de bureau | 55 |
| 2.4.1.1 | Utilisation d'interfaces à structure série | 55 |
| 2.4.1.2 | Utilisation d'interfaces à structure parallèle | 55 |
| 2.4.1.3 | Utilisation d'interfaces portables | 55 |
| 2.4.2 | Configurations à base de plan de travail | 57 |
| 2.4.2.1 | Utilisation d'interfaces à structure série | 58 |
| 2.4.2.2 | Utilisation d'interfaces à structure parallèle | 58 |
| 2.4.2.3 | Utilisation d'interfaces portables | 60 |
| 2.4.3 | Configurations à base de mur immersif | 61 |
| 2.4.3.1 | Utilisation d'interfaces à structure série | 61 |
| 2.4.3.2 | Utilisation d'interfaces à structure parallèle | 63 |
| 2.4.3.3 | Utilisation d'interfaces portables | 63 |
| 2.4.4 | Configuration à base de salle immersive | 64 |
| 2.4.5 | Configurations à base de visiocube | 65 |
| 2.4.5.1 | Utilisation d'interfaces à structure série | 65 |
| 2.4.5.2 | Utilisation d'interfaces à structure parallèle | 65 |
| 2.4.6 | Configurations à base de visio-casque | 67 |
| 2.5 | Conclusion | 67 |
| 3 | Simplification, physicalisation et rendu haptique | 69 |
| 3.1 | Introduction | 69 |
| 3.2 | Maquettes numériques et virtuelles | 69 |
| 3.3 | Traitement des maquettes numériques | 71 |
| 3.4 | Méthodologie proposée | 72 |
| 3.4.1 | Export des maquettes numériques | 72 |
| 3.4.2 | Import de maquettes virtuelles | 74 |
| 3.4.3 | Processus d'optimisation | 74 |
| 3.4.4 | Visualisation en environnement virtuel | 77 |
| 3.5 | Processus de physicalisation | 78 |
| 3.5.1 | Moteurs physiques | 78 |
| 3.5.2 | Approche proposée | 78 |
| 3.5.2.1 | Modèles physiques non-articulés | 79 |
| 3.5.2.2 | Modèles physiques articulés | 81 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.6 | Rendu haptique | 87 |
| 3.6.1 | Techniques de rendu haptique | 87 |
| 3.6.1.1 | Méthodes par pénalité | 87 |
| 3.6.1.2 | Méthodes par contrainte | 87 |
| 3.6.2 | Approche proposée | 87 |
| 3.7 | Conclusion | 90 |
| 4 | Simulation et validation de la méthodologie d'intégration | 93 |
| 4.1 | Introduction | 93 |
| 4.2 | Plate-forme de réalité virtuelle | 93 |
| 4.2.1 | Interface haptique à câbles | 94 |
| 4.2.1.1 | Espace de travail | 95 |
| 4.2.1.2 | Mesure de la position | 96 |
| 4.2.1.3 | Application des forces | 97 |
| 4.2.2 | Systèmes de capture de mouvement | 97 |
| 4.2.2.1 | Capture par champs électromagnétiques | 98 |
| 4.2.2.2 | Capture par caméras infrarouges | 98 |
| 4.2.3 | Capture du mouvement des doigts | 101 |
| 4.2.4 | Stimulations vibro-tactiles | 101 |
| 4.3 | Interaction avec un prototype de boîtier | 102 |
| 4.3.1 | Objectif | 102 |
| 4.3.2 | Environnement de manipulation | 103 |
| 4.3.3 | Architecture du système | 103 |
| 4.3.4 | Procédure d'interaction | 104 |
| 4.3.5 | Performance et bilan | 105 |
| 4.4 | Interaction avec une maquette complexe | 106 |
| 4.4.1 | Objectif | 106 |
| 4.4.2 | Maquette virtuelle | 106 |
| 4.4.3 | Procédure d'interaction | 107 |
| 4.4.4 | Performance et bilan | 107 |
| 4.5 | Interaction en environnement moteur | 108 |
| 4.5.1 | Objectif | 108 |
| 4.5.2 | Prototype virtuel | 109 |
| 4.5.3 | Architecture du système | 109 |
| 4.5.4 | Procédure d'interaction | 110 |
| 4.5.5 | Performance et bilan | 110 |
| 4.6 | Conclusion | 111 |
| 5 | Evaluation et comparaison de retours sensoriels | 113 |
| 5.1 | Introduction | 113 |
| 5.2 | Test préliminaire d'accessibilité[131] | 113 |
| 5.2.1 | Objectif | 114 |
| 5.2.2 | Tâche | 114 |
| 5.2.3 | Protocole | 114 |
| 5.2.4 | Résultats | 116 |

| | | | |
|-----|---------|---|-----|
| | 5.2.4.1 | Temps de réalisation | 116 |
| | 5.2.4.2 | Apprentissage | 117 |
| | 5.2.4.3 | Aspects subjectifs | 118 |
| 5.3 | | Tâche préliminaire de maintenance[131] | 118 |
| | 5.3.1 | Objectif | 118 |
| | 5.3.2 | Tâche | 118 |
| | 5.3.3 | Protocole | 119 |
| | 5.3.4 | Résultats | 120 |
| | 5.3.4.1 | Temps de réalisation | 120 |
| | 5.3.4.2 | Erreur de placement | 121 |
| | 5.3.4.3 | Apprentissage | 121 |
| | 5.3.4.4 | Aspects subjectifs | 124 |
| 5.4 | | Tâche de maintenance avec retour dynamique | 124 |
| | 5.4.1 | Objectif | 124 |
| | 5.4.2 | Tâche | 124 |
| | 5.4.3 | Protocole | 125 |
| | 5.4.4 | Résultats | 127 |
| | 5.4.4.1 | Temps de réalisation | 127 |
| | 5.4.4.2 | Erreur de placement | 128 |
| | 5.4.4.3 | Apprentissage | 128 |
| | 5.4.5 | Aspects subjectifs | 130 |
| 5.5 | | Tâche préliminaire d'extraction en environnement moteur[30] . . . | 130 |
| | 5.5.1 | Objectif | 131 |
| | 5.5.2 | Tâche | 131 |
| | 5.5.3 | Protocole | 131 |
| | 5.5.4 | Résultats | 132 |
| | 5.5.4.1 | Temps de réalisation | 132 |
| | 5.5.4.2 | Collisions avec le prototype | 133 |
| | 5.5.4.3 | Apprentissage | 135 |
| | 5.5.5 | Aspects subjectifs | 136 |
| 5.6 | | Intervention dextre en environnement moteur[31, 32] | 136 |
| | 5.6.1 | Objectif | 136 |
| | 5.6.2 | Tâche | 136 |
| | 5.6.3 | Protocole | 137 |
| | 5.6.4 | Résultats | 138 |
| | 5.6.4.1 | Temps de réalisation | 139 |
| | 5.6.4.2 | Collisions avec le prototype | 139 |
| | 5.6.4.3 | Apprentissage | 140 |
| | 5.6.4.4 | Aspects subjectifs | 142 |
| 5.7 | | Conclusion | 142 |

Conclusion **143**

Annexes **146**

| | | |
|----------|--|------------|
| A | Procédures de calibration | 147 |
| A.1 | Autocalibration du SPIDAR | 147 |
| A.2 | Calibration du système MOCAP | 149 |
| A.2.1 | Calibration complète | 149 |
| A.2.2 | Re-calibration | 149 |
| A.2.3 | Test de calibration | 149 |
| A.3 | Calibration avec la barre de calibration | 151 |
| A.3.1 | Processus de calibration | 151 |
| A.3.2 | Processus de re-calibration | 152 |
| A.3.3 | Test de calibration | 152 |
| B | Précision des capteurs de mouvement | 153 |
| B.1 | Précision en position du SPIDAR | 153 |
| B.2 | Précision en position du <i>PatriotTM</i> | 153 |
| B.3 | Précision en position du <i>3D Motion Captor</i> | 154 |
| C | Evolution de la fréquence de rafraîchissement | 157 |
| C.1 | Environnement de manipulation | 157 |
| C.2 | Interaction avec une maquette complexe | 159 |
| C.3 | Interaction en environnement moteur | 162 |

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Jean-Louis FERRIER, pour m'avoir accueilli au sein du LISA et pour avoir assuré la direction de mes travaux de thèse.

Je remercie aussi très chaleureusement Monsieur Paul RICHARD, pour m'avoir guidé tout au long de cette thèse et m'avoir fait bénéficier de sa grande connaissance du domaine de la réalité virtuelle.

Que Messieurs Frédéric MERIENNE et Patrick MILLOT reçoivent aussi tous mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail en qualité de rapporteurs.

Je remercie également très chaleureusement Monsieur Arnaud PERROTIN, Directeur de la Recherche et Développement de Valeo Lighting Systems Angers pour m'avoir permis d'effectuer ces travaux dans le cadre d'une convention CIFRE. Un grand merci à Messieurs Sebastien DENIS et Xavier GALLARD, respectivement, Responsable du Bureau d'études et Responsable informatique technique chez Valeo Lighting Systems Angers, pour m'avoir soutenu et aidé tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à Messieurs Jérôme GROSJEAN, Maître de Conférences à l'Université de Strasbourg, et Malik MALLEM, Professeur à l'Université d'Evry, pour avoir accepté de faire partie du jury en qualité d'examineurs.

Je remercie également Madame Emmanuelle RICHARD, pour son soutien et pour la relecture de ce manuscrit.

Enfin, je tiens à remercier mes collègues du LISA et de l'ISTIA : Ludovic HAMON, Mickael NAUD, Sehat ULLAH, et bien sur Monsieur Fanck COADOU, pour leur soutien et leur bonne humeur.

Introduction

La conception d'un nouveau véhicule passe par la réalisation de prototypes que les constructeurs utilisent pour effectuer des tests, valider des concepts et évaluer les différentes étapes liées à la méthode de conception.

Depuis quelques années, la plupart d'entre eux innove en faisant appel aux techniques de la réalité virtuelle¹ (RV). Cette approche possède un fort potentiel en terme de gain de temps et de réduction des coûts. Elle permet également d'évaluer de nouvelles approches liées au processus de conception lui-même. Cependant, un certain nombre de verrous technologiques et méthodologiques subsistent. Ils concernent en particulier (i) la simplification et la physicalisation² des maquettes numériques issues des logiciels de CAO, (ii) le développement de configurations visuo-haptiques adaptées aux différentes tâches impliquées par le prototypage virtuel, et (iii) l'identification des retours sensoriels les plus pertinents, permettant à l'opérateur d'effectuer ces tâches efficacement.

Un ensemble de problématiques soulevées par le service R&D de Valeo Lighting Systems (Angers) nous a conduit à traiter les trois aspects évoqués ci-dessus. Les tâches étudiées sont liées à l'accessibilité, l'extraction et la manipulation de lampes sur prototype virtuel à l'échelle 1:1.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous traitons les limites du prototypage réel et les apports liés au prototypage virtuel. Ces apports sont examinés en particulier pour les phases de création et de validation des prototypes. Puis, nous identifions les exigences liées à l'interaction avec les prototypes en environnement virtuel. Celles-ci sont analysées selon des critères ergonomiques, physiologiques et psychologiques.

Dans la deuxième partie du manuscrit, nous présentons un état de l'art exhaustif (1) des dispositifs d'affichage (interfaces visuelles), en analysant séparément les configurations immersives et les configurations non-immersives, (2) les interfaces à retour d'effort existantes, que nous avons classées en fonction de leur architecture mécanique et de leur support de référence (fixe ou portable). Nous décrivons ensuite les différentes technologies utilisées pour les interfaces à retour tactile.

1. La réalité virtuelle peut être définie comme un ensemble d'outils et de techniques permettant d'interagir en temps réel avec un environnement multisensoriel, via des métaphores d'interaction intuitives basées sur les capacités naturelles d'action, de perception et de communication de l'homme.

2. La physicalisation peut être définie par un processus consistant à donner des caractéristiques physiques aux maquettes virtuelles dans le but de gérer les collisions et la dynamique de celles-ci.

Enfin, nous présentons les différentes configurations visuo-haptiques existantes afin d'identifier les plus adaptées à notre problématique.

La troisième partie de ce manuscrit est dédiée à la simplification et l'intégration (optimisation et physicalisation) de maquettes virtuelles ainsi qu'à l'intégration du modèle biomécanique de l'opérateur humain. Après une revue des méthodes et outils existants, nous proposons une méthodologie de transformation permettant une cohérence maximale entre les modèles graphiques (visualisés par l'opérateur) et les modèles physiques (calcul des collisions, comportement dynamique). Nous montrons en particulier que le temps de physicalisation des données, via notre approche, n'est pas un facteur limitant pour le processus global. Nous traitons la physicalisation de modèles statiques et articulés. Enfin, nous proposons une méthode simple et pertinente pour le rendu haptique de maquettes virtuelles. Cette méthode est basée sur l'utilisation du moteur physique NovodeXTM.

La quatrième partie commence par une description technique et fonctionnelle de la plate-forme de réalité virtuelle développée dans le cadre de notre travail. Une description approfondie de l'interface haptique utilisée (*SPIDAR*) est effectuée. Différentes simulations permettant de valider la méthodologie d'intégration proposée sont décrites. Celles-ci permettent en particulier d'analyser l'évolution de la fréquence de rafraîchissement des images et en particulier l'impact de la surcharge de calcul relative à la gestion des collisions par le moteur physique. L'objectif est de déterminer les limites de la méthodologie proposée et de la plate-forme développée.

Dans la dernière partie du manuscrit, nous décrivons une série cohérente et progressive d'expérimentations permettant d'évaluer la pertinence et l'influence de différentes modalités sensorielles (visuelle, sonore, vibro-tactile, et kinesthésique) sur la performance d'opérateurs humains, l'objectif étant d'identifier les avantages et inconvénients de ces retours d'information dans différentes configurations matérielles. Plusieurs paradigmes expérimentaux basés sur l'utilisation systématique de la substitution sensorielle³ sont proposés. Les tâches étudiées sont relatives à l'accessibilité, à l'extraction et la manipulation de lampes dans leur environnement (boîtier et environnement moteur). Les résultats des expérimentations sont analysés via différents indicateurs de performance (temps de réalisation des tâches, précision de placement). Des données subjectives sont également recueillies via l'observation des sujets pendant l'exécution des tâches et à partir de questionnaires.

3. La substitution sensorielle peut être définie comme la transmission au cerveau d'informations appartenant à un domaine sensoriel donné à l'aide de récepteurs, voies, projections cérébrales, et aires d'intégration et de représentation d'un autre système sensoriel [156].

Chapitre 1

Prototypage et exigences de l'interaction en EV

1.1 Introduction

Ce chapitre traite dans un premier temps du prototypage. Après une définition et une classification des différents types de prototypes, nous examinons les limites et les contraintes du prototypage réel. Puis nous faisons état des apports et des limitations liées à l'utilisation de prototypes virtuels. Nous analysons en particulier les phases de création et de validation. Nous examinons également les exigences liées à l'interaction avec des prototypes en environnement virtuel. Celles-ci sont classées selon des critères ergonomiques, physiologiques et psychologiques. Enfin, nous analysons les contraintes spécifiques liées à l'interaction multimodale et en particulier à l'interaction visuo-haptique.

1.2 Le prototypage

1.2.1 Définition et classification

Un *prototype* est un premier exemplaire construit d'un ensemble mécanique, d'un appareil, d'une machine, ou d'un système, et qui est destiné à en expérimenter en service, les qualités en vue de la construction en série, ainsi que les problèmes liés à la construction (Petit Larousse Illustré).

Dans de nombreux domaines industriels, le *prototypage* est une phase importante de la conception d'un produit. Il permet de tester la validité du processus de fabrication du produit. Il est aussi utilisé pour la vérification du respect du cahier des charges, tant sur le plan du fonctionnement que sur celui de la faisabilité.

L'évaluation des qualités d'un produit peut se faire à l'aide de son *prototype réel* ou grâce à une *représentation virtuelle*. La fonction principale du prototype, qu'il soit réel ou virtuel, est de gagner de la perspicacité dans une conception et d'appréhender certains aspects importants liés par exemple à la forme du produit. Les prototypes obligent le concepteur à concrétiser ses pensées

et ses idées plus ou moins abstraites et ont un caractère intégrateur [143].

Différentes méthodes de prototypage existent. Ainsi, sont apparues de nombreuses méthodes traditionnelles de fabrication de maquettes physiques qui dépendent fortement du domaine de conception, des différentes approches, de l'art des équipes de conception, et des ressources disponibles.

Qu'ils soient réels ou virtuels, les **prototypes** peuvent être classés en 4 catégories de base, en fonction de leur degré de ressemblance (aspect ou fonctionnalité), avec le produit final :

- le **prototype "preuve-de-principe"** est utilisé pour tester certains aspects du design et de la conception. Il est destiné au choix des matériaux ou du procédé de fabrication sans essayer de simuler exactement l'apparence visuelle du produit final.
- le **prototype d'étude de forme** permet aux designers d'explorer la taille, l'apparence d'un produit sans en simuler la fonction réelle ou l'apparence visuelle exacte. Il peut aider à évaluer des facteurs ergonomiques et fournir un aperçu des aspects visuels de la forme finale du produit. Ces prototypes physiques sont souvent fabriqués à la main ou usinés dans des matériaux facilement sculptés, peu coûteux (par exemple, la mousse de polyuréthane) sans présenter la couleur, la finition, ou la texture du produit final. Ces modèles sont destinés à la prise de décisions en interne et ne sont généralement pas utilisés pour des tests utilisateurs/consommateurs.
- le **prototype visuel** (ou modèle) prend en compte le design, l'esthétique et simule l'apparence du produit final, avec des textures colorées et superficielles mais n'incluent pas toutes ses fonctions et fonctionnalités. Ces modèles sont utilisés dans l'étude de marché, pour la fabrication de maquettes et la documentation commerciale.

Il est d'usage courant d'utiliser les termes **maquette numérique** (**Figure 1.1 (a)**) et **maquette physique** (**Figure 1.1 (b)**), issue de la conception assistée par ordinateur (CAO), aux trois catégories précédentes, tandis que le terme **prototype**, qu'il soit réel ou virtuel est réservé plus spécifiquement au prototype fonctionnel.

- le **prototype fonctionnel** simule le design final, l'esthétique, les matériaux ainsi que les fonctions et fonctionnalités du produit final. Lorsqu'il est réel (**Figure 1.1 (c)**) ou augmenté (**Figure 1.1 (d)**), le prototype fonctionnel peut être réduit en taille pour diminuer les coûts de fabrication. Cependant la construction d'un prototype grandeur nature (échelle 1:1) entièrement fonctionnel est une étape indispensable pour le bureau d'étude pour vérifier et aussi apporter des améliorations avant la mise en production du produit.



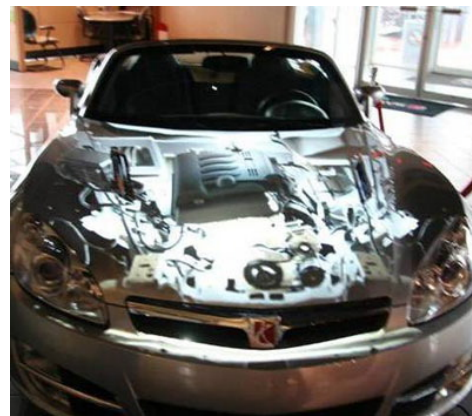
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 1.1 – Véhicules automobiles à différents stades de conception : (a) maquette numérique, (b) maquette physique, (c) prototype réel et (d) prototype augmenté.

1.2.2 Prototypage virtuel versus réel

Dans cette partie nous décrivons les limites et les contraintes liées à l'utilisation de prototypes réels. Puis nous mettons en évidence les intérêts du *prototypage virtuel* ainsi que les limites de cette approche.

1.2.2.1 Prototypage réel : limites et contraintes

La phase de prototypage réel comprend généralement deux étapes :

- la fabrication du *prototype*,
- les tests de validations de celui-ci.

Cependant, l'utilisation d'un *prototype réel* présente certains inconvénients et limitations qui sont liés en particulier à sa fabrication :

- outillage : La réalisation d'un nouveau modèle impose une mise à jour et une mobilisation des outils de fabrication. Ceci implique un coût et impose des contraintes liées à la forme et la qualité des prototypes.
- matière première : Un nouveau prototype exige l'utilisation de matière première qui n'est généralement pas réutilisée.
- temps de fabrication : Au cours du développement d'un produit, différents prototypes sont fabriqués. Un retard dans la fabrication d'un prototype engendre un décalage des jalons de validation et donc un coût supplémentaire pour le fournisseur.
- nombre de prototypes : Plus le nombre de prototypes réalisés durant les phases préliminaires de conception est important, plus les contraintes évoquées ci-dessus sont prépondérantes. Cela a un impact direct sur le coût global de l'étude (temporel, matériel et donc financier).

En outre, d'autres contraintes concernent la phase de validation et de test des prototypes telles que :

- conditions de sécurité : Les lois de la physique imposent de fortes contraintes de sécurité, par exemple lors de la validation de prototypes lourds et/ou volumineux (validation de l'empreinte d'un moule pesant plusieurs tonnes).
- outils d'observation et d'analyse : L'observation et les tests nécessitent l'utilisation de dispositifs dédiés, comme des manipulateurs ou des appareillages de mesure. Notons que dans le cas du *prototypage réel*, ces dispositifs sont contraints par les lois physiques.

1.2.2.2 Prototypage virtuel : intérêts et limitations

Afin de diminuer les coûts (temporels, matériels, et donc financiers) liés au *prototypage réel*, l'industrie automobile s'oriente vers une nouvelle approche : le *prototypage virtuel*. L'utilisation d'un *prototype virtuel* offre en particulier une plus grande flexibilité dans la conception des véhicules.

Schaaf [136] définit le *prototypage virtuel* (PV) comme une représentation 3D qui permet une analyse de la forme, des dimensions, des facteurs humains et de la faisabilité générale d'un produit. Selon Fuchs [52], le *prototype virtuel* est une représentation fonctionnelle du produit avec laquelle l'utilisateur peut interagir, éventuellement en immersion. Le *prototypage virtuel* est généralement considéré comme la partie amont du processus de gestion du cycle de vie d'un produit qui prend en compte toutes les contraintes de fabrication, d'utilisation et de maintenance.

L'idée de base du *prototype virtuel* est le remplacement du *prototype réel* par son équivalent virtuel. Cette approche permet de se libérer des contraintes précédemment évoquées (diminution des coûts de conception des produits, des délais, etc.). L'utilisation de *prototypes virtuels* n'exclut pas totalement celle du *prototype réel*, qui sera tout de même construit en étape finale du prototypage.

Intérêt du prototypage virtuel Les principaux apports du *prototypage virtuel* lors de la phase de création du prototype sont :

- outillage : le *prototypage virtuel* n'implique aucune adaptation de l'outillage aux différents prototypes,
- matière première : aucune matière première n'est nécessaire pour la réalisation des *prototypes virtuels*, il n'a y donc ni transport, ni logistique,
- temps de conception : les délais de fabrication d'un *prototype virtuel* sont plus courts. En fait, il ne s'agit plus de délais de fabrication mais de délais de transformation des maquettes numériques. Les modifications sont donc moins contraignantes et n'entraînent pas de modification de l'outillage. Le temps de modification s'en trouve considérablement diminué.
- lois physiques : dans un environnement virtuel, les lois physiques peuvent ne pas être respectées. Ainsi, la manipulation du *prototype virtuel* peut devenir très simple et permettre une meilleure observation. Par exemple, la caméra virtuelle peut être placée à des endroits stratégiques difficiles à atteindre dans la réalité.
- duplication et disponibilité des prototypes : la duplication de *prototypes virtuels* est simple, rapide et ne demande pas de coûts additionnels comme dans le cas du *prototypage réel*. En outre, les contraintes liées au déplace-

ment des prototypes n'existent plus. De plus, le *prototypage virtuel* offre la possibilité de modifier les *prototypes virtuels* à distance (travail collaboratif distribué).

- outils : l'utilisation de *prototypes virtuels* permet d'envisager de nouveaux outils de tests et d'observation. De plus ceux-ci peuvent être modifiés en temps réel grâce à des outils propres aux techniques de réalité virtuelle.

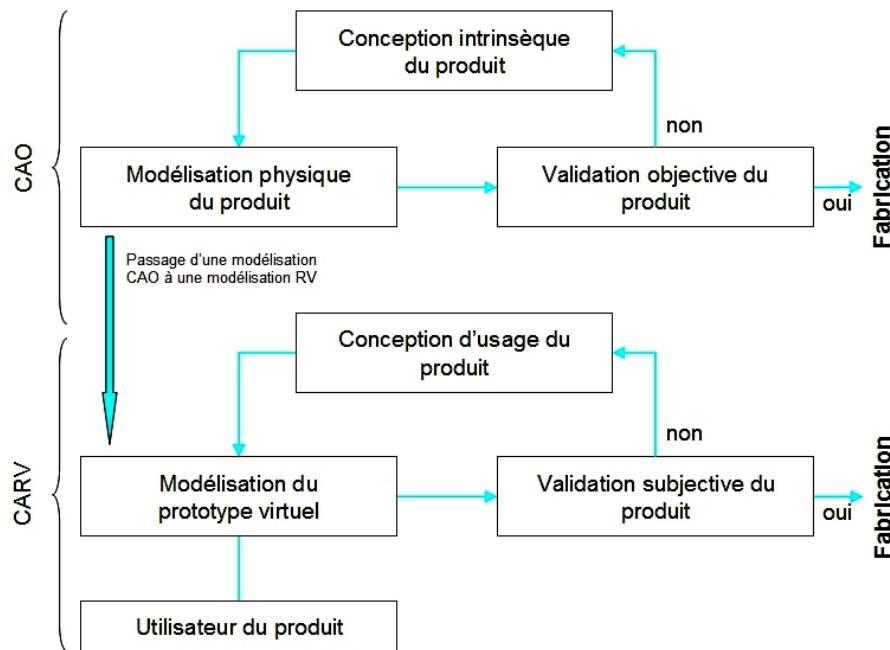


FIGURE 1.2 – Illustration de l'apport de la CARV dans le processus de conception.

Dans le contexte du *prototypage virtuel*, la **CARV** (**C**onception **A**ssistée **p**ar la **R**éalité **V**irtuelle) offre de nouvelles possibilités principalement liées (i) à l'interaction avec les *maquettes virtuelles* ou *prototypes virtuels*, (ii) à la visualisation des produits dans leur contexte d'utilisation (échelle 1:1), et (iii) à l'immersion de l'utilisateur dans l'environnement du *prototype virtuel*. Cette nouvelle approche permet ainsi de tester et de valider le produit, principalement à partir de critères esthétiques, ergonomiques ou fonctionnels. La **figure 1.2** montre l'apport de la **CARV** dans le processus de conception d'un produit.

Nos travaux s'incrivent dans le développement de la **CARV** et en particulier dans l'intégration de *prototypes* en environnement virtuel échelle 1:1, permettant d'étudier la performance d'opérateurs humains dans des tâches impliquant l'extraction et la manipulation de lampes en environnement moteur.

1.3 Exigences de l'interaction en EV

Nous avons décrit dans les paragraphes précédents, les intérêts et les contraintes liés au *prototypage virtuel*. Nous allons à présent voir que l'intégration d'une maquette ou d'un prototype dans un environnement virtuel (EV) impose des contraintes supplémentaires et des exigences d'ordre ergonomique, physiologique et psychologique. Celles-ci sont relatives aux dispositifs d'affichage et autres interfaces sensorielles, ainsi qu'aux périphériques d'interaction (interfaces motrices et sensori-motrices). Nous traitons séparément les exigences liées à l'interaction visuelle ou sensori-motrice et celles liées à l'interaction haptique. Puis nous analysons les contraintes (compatibilité, etc.) relatives à l'intrégration multimodale et visuo-haptique en particulier. La **figure 1.3** illustre l'architecture générale d'un système de réalité virtuelle. On remarque que l'utilisateur agit sur le système via des interfaces motrices et que le système réagit sur l'utilisateur via des interfaces sensorielles. Les interfaces à retour d'effort sont des interfaces dites sensori-motrices dans la mesure où elles enregistrent une position (entrée) et appliquent une force (sortie).

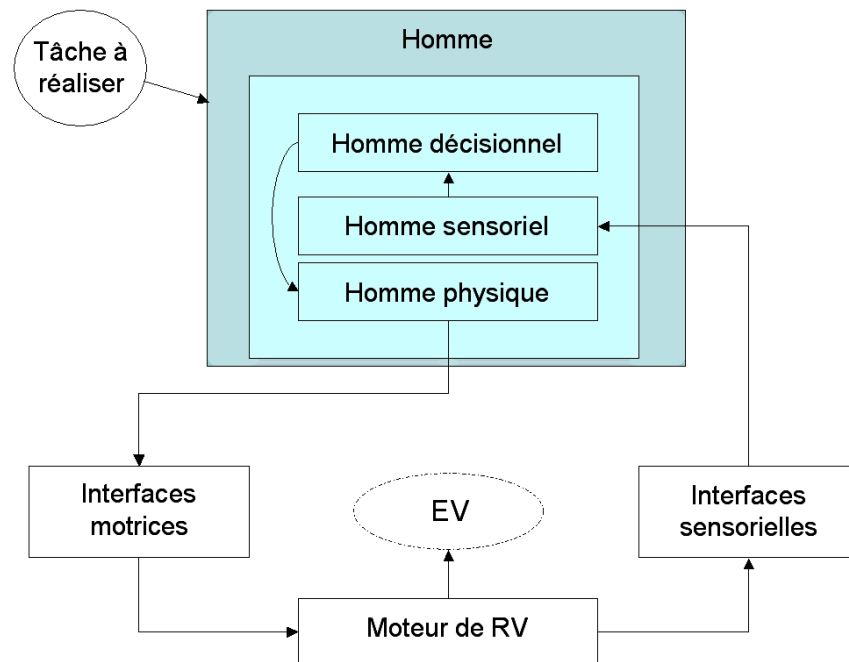


FIGURE 1.3 – Architecture d'un système de réalité virtuelle.

1.3.1 Interaction visuelle

L'interaction et l'immersion dans un environnement virtuel exigent l'utilisation de dispositifs d'affichage (visiocasques, écrans stéréoscopiques, etc.) et de

systèmes de capture de mouvement. Pour que le système global soit efficace, ces interfaces et périphériques d'interaction doivent respecter un certain nombre de conditions naturelles dans lesquelles l'homme évolue. Les périphériques d'interaction et/ou casques de visualisation (visiocasques) doivent, par exemple, avoir un poids et un encombrement relativement faibles, afin de limiter leur impact sur les mouvements/actions effectués par l'opérateur et sur la pénibilité des tâches simulées.

1.3.1.1 Exigences physiologiques

Les exigences physiologiques que doit respecter le dispositif d'affichage ne s'adressent qu'aux parties physiques et physiologiques du système visuel humain. Les plus importantes sont (i) l'*amplitude du champ de vision*, (ii) la *résolution spatiale* des images, (iii) la *résolution temporelle* des images, (iv) la *convergence du regard*, et (v) l'*accommodation* [27].

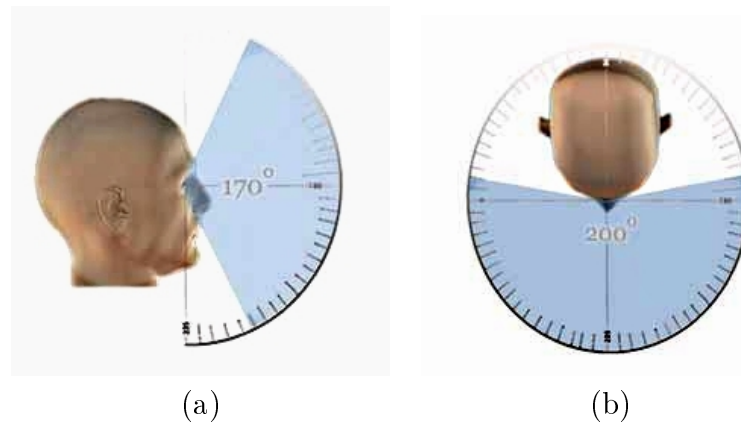


FIGURE 1.4 – Illustration du champ visuel humain : (a) vertical et (b) horizontal.

Champ de vision La réduction du *champ de vision*, illustré à la **figure 1.4**, peut avoir des conséquences importantes sur le comportement et la performance [10]. En effet, elle modifie la représentation spatiale de l'environnement et affecte, en particulier, la perception des vitesses et la capacité de navigation. A contrario, une immersion prolongée avec un *champ de vision* important engendre, dans certains cas (présence de délais temporels, etc.), des conflits vestibulo-oculaires et des effets secondaires importants. L'amplitude du *champ de vision* est inversement proportionnelle à la résolution spatiale des images : un accroissement de l'un entraîne une réduction de l'autre, un compromis entre ces deux paramètres est donc nécessaire. La **figure 1.5** illustre la réduction du *champ de vision* humain engendrée par le port d'un visiocasque. En effet, la zone grisée centrale (champ de vision lors du port d'un visiocasque) est beaucoup plus petite que la zone définissant le champ de vision normal.

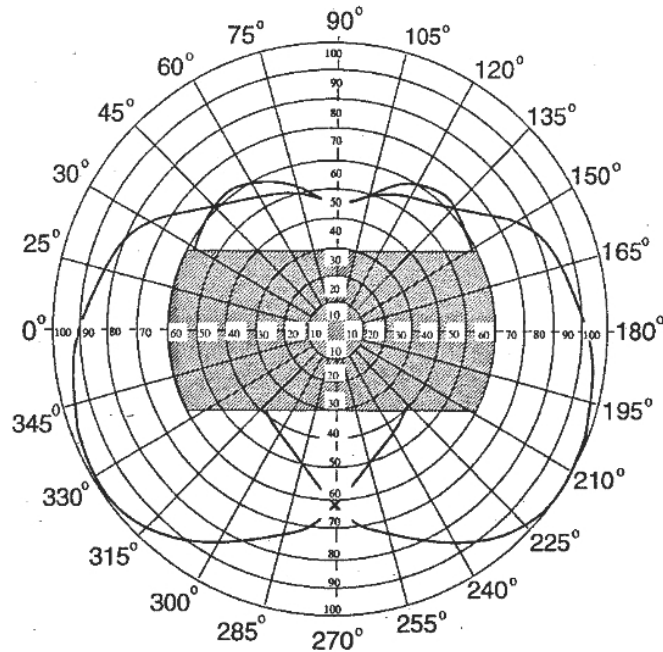


FIGURE 1.5 – Illustration de la réduction du *champ de vision* due à l'utilisation d'un visiocasque (partie centrale).

Résolution spatiale Comme l'amplitude du *champ de vision*, la *résolution spatiale* des images peut avoir une influence non négligeable sur la perception de l'environnement virtuel. Ainsi, une faible *résolution spatiale* des images peut engendrer des difficultés lors de la détermination de la position et de l'orientation d'objets virtuels éloignés ou de petite taille [121]. Un des problèmes majeurs liés à l'utilisation de visiocasques est leur faible *résolution spatiale*. La **figure 1.6** illustre la dégradation de la *résolution spatiale* des images, engendrée par l'utilisation d'un visiocasque.

Résolution temporelle La *résolution temporelle* des images est la fréquence avec laquelle l'évolution de l'environnement est présentée à l'opérateur. Celle-ci a une influence considérable sur (i) la perception visuelle (structure de l'environnement et mouvement), (ii) les mouvements oculaires (**Figure 1.7**) et (iii) le contrôle des mouvements. La *résolution temporelle* des images est liée à un certain nombre de facteurs logiciels et matériels. Ces facteurs sont : (i) la fréquence d'écran (donnée constructeur), (ii) la fréquence de rafraîchissement des images et (iii) le décalage temporel (retard entre les mouvements de l'utilisateur et leur prise en compte dans l'affichage). Lorsqu'un utilisateur interagit avec un environnement virtuel dans lequel sa position n'est pas prise en compte, la *résolution temporelle* et la fréquence de rafraîchissement des images se confondent.

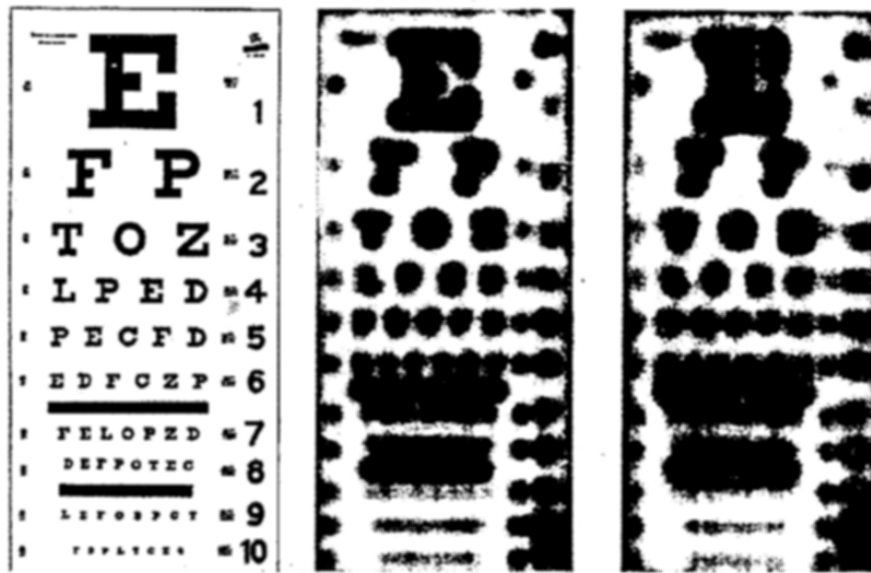


FIGURE 1.6 – Illustration de la dégradation de la résolution spatiale des images lors de l'utilisation d'un visiocasque.

Fréquence d'écran La *fréquence d'écran* dépend uniquement du matériel utilisé. Ce paramètre détermine le nombre d'images que chaque oeil perçoit par seconde. La visualisation stéréoscopique active exige une *fréquence d'écran* minimale de 120 Hz (60 Hz par oeil). Notons qu'en vision monoscopique et stéréoscopique, une *fréquence d'écran* trop faible engendre une fatigue visuelle importante.

Fréquence de rafraîchissement La *fréquence de rafraîchissement* est la fréquence à laquelle le système affiche une image nouvelle de l'environnement virtuel. Par exemple, si un système a une fréquence d'écran de 60 Hz, mais une *fréquence de rafraîchissement* de 4 images par seconde (Ips), le système présentera 15 images consécutives identiques de l'environnement avant d'afficher une nouvelle image. L'opérateur verra alors l'environnement virtuel évoluer à une fréquence de quatre images par seconde, ce qui est très limitant. Richard [127] et al. ont étudié l'influence de la *fréquence de rafraîchissement* sur la performance humaine dans différents types de tâches (interception, manipulation d'objets, etc.). Ils ont observé que celle-ci ne devait pas être inférieure à 14 Ips.

Décalage temporel Un *décalage temporel* peut être dû : (i) à une surcharge de calcul, (ii) à une faible fréquence d'échantillonnage du système de capture de mouvement, et éventuellement (iii) à un retard de transmission d'informations provenant d'un site éloigné (EV distribués). Wloka [155] a montré que si l'ensemble des délais d'un système de RV dépasse 300 ms, alors, l'utilisateur perd la sensation d'immersion.

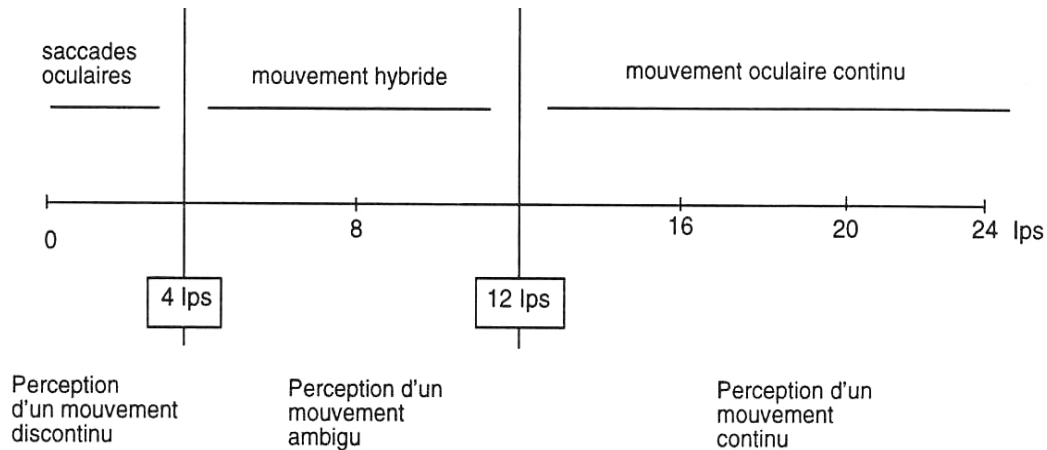


FIGURE 1.7 – Mouvements oculaires et perception visuelle du mouvement dans un environnement virtuel.

1.3.1.2 Perception de la profondeur

Une interaction visuelle efficace exige une bonne perception de la structure tridimensionnelle de l'environnement virtuel. La *perception de profondeur* repose sur différents indices visuels : la taille relative et l'interposition (**Figure 1.8 (a)**), l'ombrage (shading) (**Figure 1.8 (b)**), la perspective linéaire (**Figure 1.8 (c)**), l'ombre portée (**Figure 1.8 (d)**), la parallaxe de mouvement (**Figure 1.9**), et la disparité binoculaire (**Figure 1.10**).

Ombrages et ombres portées Les *ombrages et ombres portées* (effets d'ombrage) permettent la perception tridimensionnelle des objets virtuels par la prise en compte de la position des sources lumineuses et l'interpolation des normales définissant l'orientation des polygones (facettes) constituant ces objets. En ce qui concerne les ombres portées, plusieurs études ont montré qu'elles procurent des informations très pertinentes sur la position relative des objets dans un environnement 3D [86, 84, 127].

Parallaxe de mouvement La *parallaxe de mouvement* ou distribution de vitesse du flux optique sur la rétine est un indice monoculaire relativement puissant [132]. Cet indice fournit une information sur la position relative des objets via leur vitesse apparente. Trois cas peuvent être envisagés : (i) l'opérateur est en mouvement dans un environnement statique, (ii) l'opérateur est immobile dans un monde en mouvement, (iii) l'opérateur se déplace dans un monde en mouvement. Lorsqu'un objet virtuel tourne de manière autonome autour d'un axe principal, on parle d'effet cinétique de profondeur (KDE - Kinetic Depth Effect).

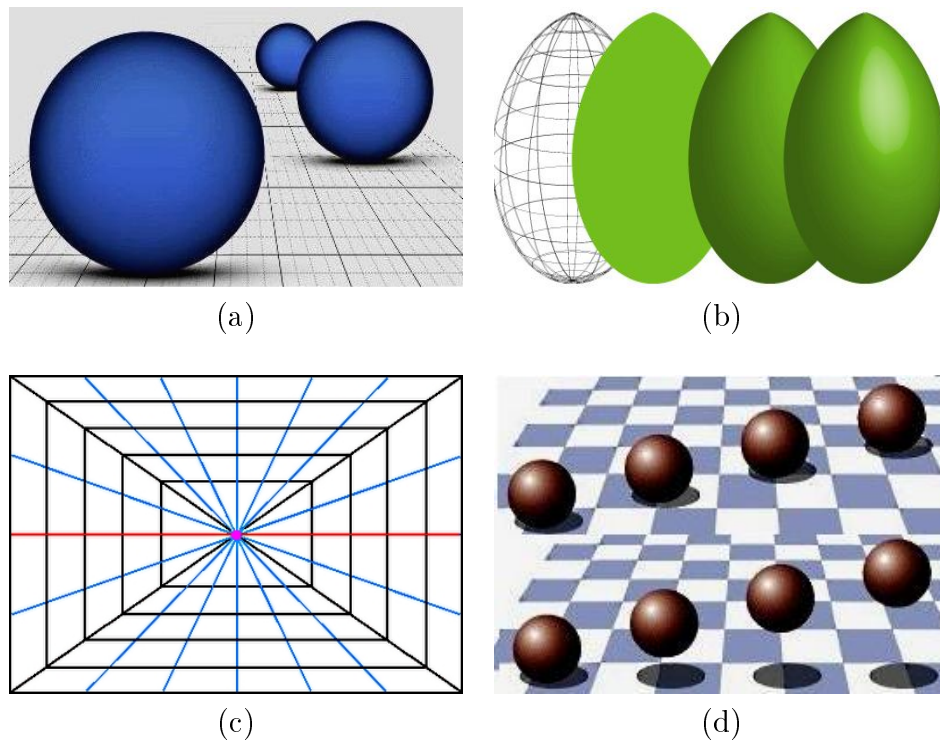


FIGURE 1.8 – Indices visuels de profondeur monoscopiques : (a) taille relative et interposition, (b) shading, (c) perspective linéaire et (d) ombre portée.

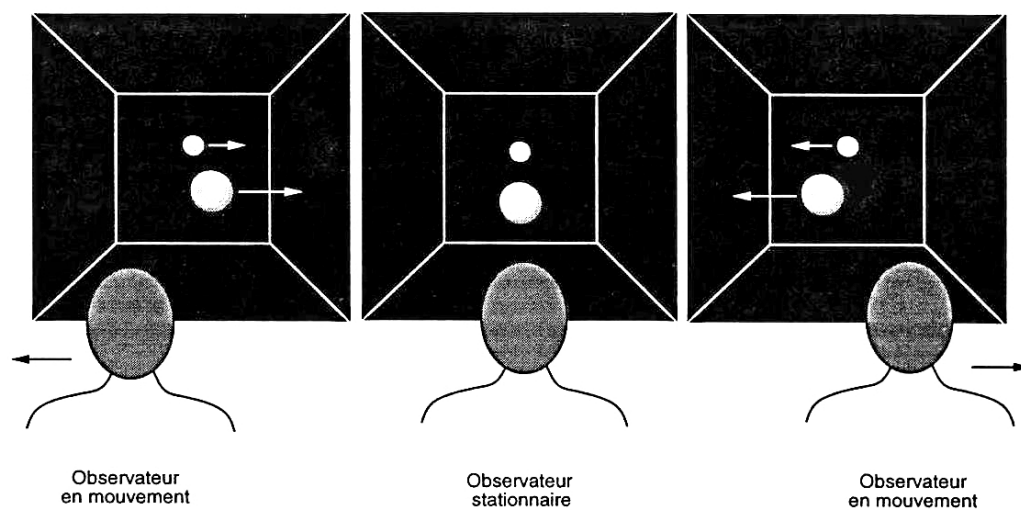


FIGURE 1.9 – Illustration de la perception de la profondeur induite par le mouvement relatif des objets d'une scène virtuelle (parallaxe de mouvement).

Disparité binoculaire La *disparité binoculaire* est à la base de la vision stéréoscopique. Elle provient de la position décalée, de 3,25 cm en moyenne, de chaque oeil. L'image reçue par l'oeil gauche est donc décalée par rapport à celle reçue par l'oeil droit, et vice-versa. C'est la fusion de ces deux images qui procure l'effet de relief. La vision stéréoscopique artificielle peut être restituée de différentes manières. La plus courante consiste à effectuer un multiplexage temporel des images destinées à l'oeil droit et des images destinées à l'oeil gauche (stéréoscopie active). Une méthode moins intrusive est basée sur l'utilisation de lunettes polarisées. Les deux images sont alors affichées simultanément (multiplexage spatial) et filtrées.

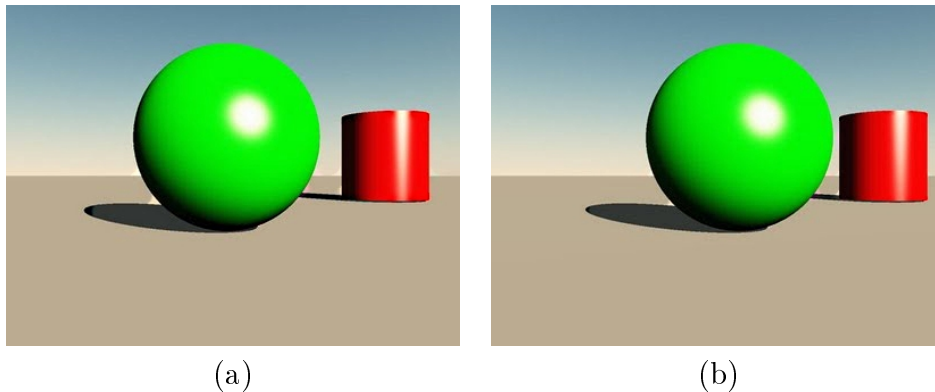


FIGURE 1.10 – Illustration de la disparité entre l'image vue par (a) l'oeil droit et par (b) l'oeil gauche, lors d'un affichage stéréoscopique. On observe un léger décalage interprété par le cerveau comme un indice de profondeur.

1.3.1.3 Contrôle des mouvements

Le *contrôle d'un mouvement* est effectué grâce (i) aux systèmes vestibulaires, kinesthésiques et proprioceptifs qui fournissent des informations relatives à la position du corps dans l'espace, et (ii) au système visuel qui vient, en général, confirmer ces informations. En environnement virtuel, les informations visuelles ne sont pas toujours en cohérence avec les informations proprio-vestibulo-kinesthésiques. Les distorsions perceptuelles engendrées par ces incohérences sont liées à certains facteurs évoqués précédemment (résolution temporelle, perception spatiale, etc.) ainsi qu'à la présence de décalages spatiaux entre les mouvements de l'opérateur et leur restitution visuelle. Dans les paragraphes suivants, nous précisons la nature et l'origine de ces décalages.

Décalages spatiaux les *décalages spatiaux* peuvent être de différente nature : il peut s'agir (i) d'erreurs d'échelle, (ii) d'erreurs de translation/rotation ou (iii) de bruits de position.

Les erreurs d'échelle Les *erreurs d'échelle*, illustrées à la (Figure 1.11 (a)), introduisent un gain (supérieur ou inférieur à 1) entre les mouvements de

l'opérateur et leur restitution visuelle. Ce type d'erreurs est donc susceptible de perturber la coordination visuo-motrice lors de l'exécution d'un mouvement. Les *erreurs d'échelles* ont quelquefois été utilisées pour augmenter la précision d'un mouvement à l'approche d'un objet ($\text{gain} < 1$) ou pour augmenter artificiellement l'espace de travail de l'utilisateur. L'utilisation de gains non-linéaires a aussi été proposée afin d'augmenter l'espace de travail de l'utilisateur tout en lui permettant d'effectuer des mouvements précis dans un espace proche de lui (go-go technique) [22].

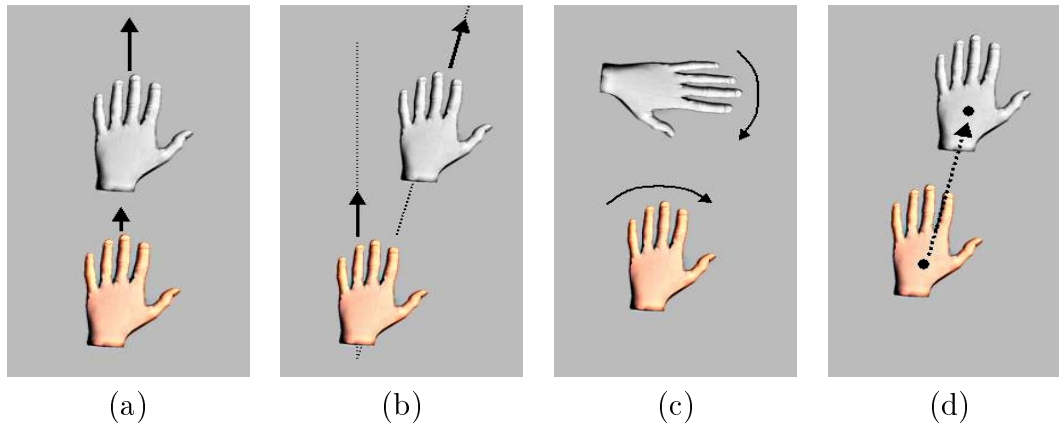


FIGURE 1.11 – Illustration des décalages spatiaux pouvant survenir entre les mouvements de l'opérateur et son avatar : (a) erreurs d'échelle, (b) erreurs de translation, (c) erreurs de rotation et (d) bruit de position.

Les erreurs de translation/rotation Ces erreurs sont illustrées sur les figures 1.11 (b) et 1.11 (c). Elles introduisent une dérive entre les mouvements (translation ou rotation) de l'opérateur et leur représentation graphique.

Les bruits de position Ce type de bruit, illustré sur la (figure 1.11 (d)), est dû à la *résolution spatiale* du système de capture de mouvement qui peut varier en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur (cas des systèmes électromagnétiques). Le *bruit de position* engendre ainsi une imprécision dans la mesure de la position et de l'orientation de l'utilisateur. De plus, il fluctue en fonction du temps.

1.3.2 Interaction haptique

La *perception haptique* est basée sur un grand nombre d'informations provenant d'un ensemble de récepteurs sensoriels situés au niveau des articulations, des tendons, des muscles et de la peau. L'*interaction haptique* avec des objets virtuels repose sur l'utilisation d'interfaces qui permettent de transmettre à l'utilisateur deux types d'informations : des informations *kinesthésiques* (interfaces à

retour d'effort) et des informations *tactiles* (interfaces à retour tactile) [26]. La **figure 1.12** illustre ces deux types d'interfaces haptiques.

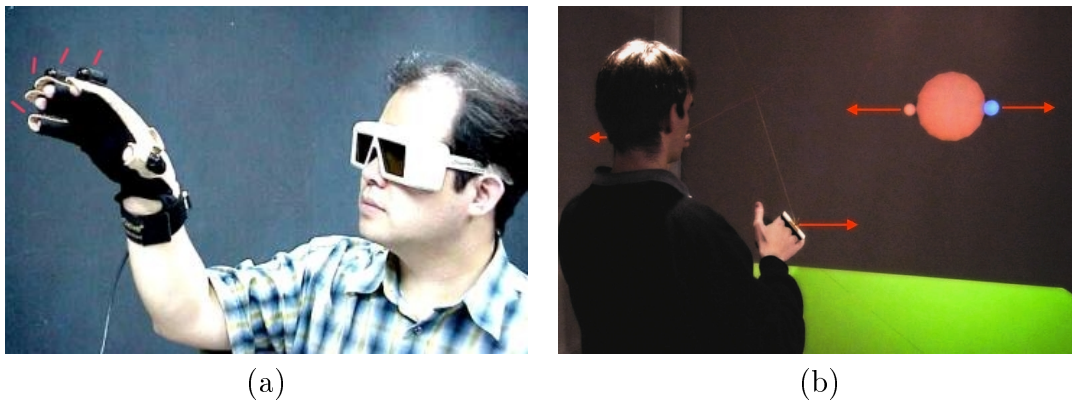


FIGURE 1.12 – Illustration des deux types d'interfaces haptiques : (a) interface à retour tactile (stimulation des couches supérieures de l'épiderme) et (b) interface à retour d'effort (application de contraintes mécaniques sur les mains).

Un système à retour d'effort doit respecter un certain nombre de conditions ergonomiques. La première est liée à la sécurité de l'opérateur. Dans le cas des systèmes portables positionnés sur la main ou sur le bras de l'utilisateur, la contrainte qui prédomine est le poids. En effet, ceux-ci doivent être relativement légers afin de ne pas trop gêner l'opérateur dans sa tâche.

1.3.2.1 Exigences physiologiques

Les *exigences physiologiques* ne s'adressent qu'aux parties physiques et physiologiques du système haptique. Les plus importantes sont (i) la *bande passante* du système, (ii) l'*amplitude des forces* maximale que le système peut appliquer sur la main de l'opérateur et (iii) la *résolution en effort*.

Bande passante La *bande passante* d'un système à retour d'effort est la fréquence avec laquelle il peut (1) recevoir les commandes motrices venant de l'opérateur humain et (2) renvoyer des informations haptiques vers celui-ci. La **figure 1.13** illustre les exigences d'entrée/sortie d'un gant à retour d'effort. La main humaine peut percevoir des informations sur une très large bande de fréquences. Par exemple, l'interaction haptique avec une surface rigide exige une bande passante idéalement infinie. Cependant, la perception haptique d'un objet élastique comme une balle en caoutchouc, n'exige qu'une *bande passante* de quelques dizaines de hertz.

Résolution en effort La *résolution en effort* correspond à la plus petite variation de force que l'interface haptique peut transmettre à l'utilisateur. Cette variation doit être supérieure ou égale au seuil de discrimination du système haptique humain. Ce seuil de discrimination varie fortement avec l'endroit du corps

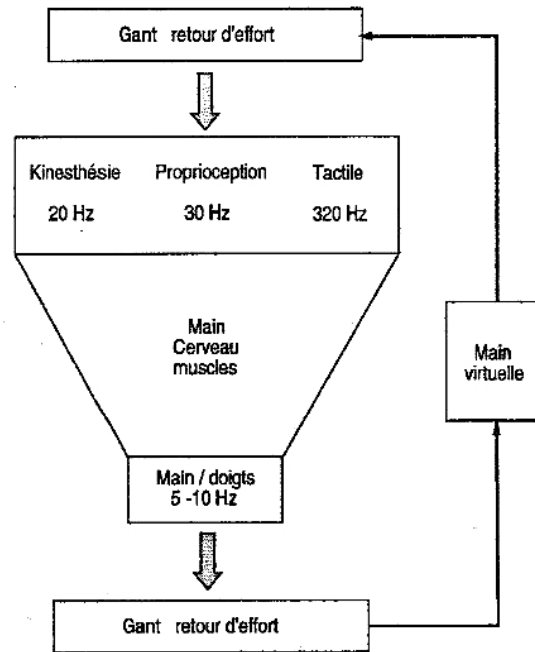


FIGURE 1.13 – Illustration des exigences d'entrée/sortie d'un gant à retour d'effort.

où est appliquée la stimulation, l'extrémité des doigts de la main étant la zone la plus sensible. Dans ce contexte, on parle aussi de la plus petite distance perçue entre deux stimuli. Par exemple, pour l'extrémité des doigts, cette distance est de 2 mm, alors qu'elle passe à 2 cm pour une stimulation dans le dos.

Amplitude des forces Un système à retour d'effort doit être conçu pour développer une force qui permette de bloquer le mouvement de l'utilisateur. En outre, l'amplitude minimale des forces appliquées par un système à retour haptique doit être supérieure au seuil de perception [140]. Ceci est critique dans le cas des interfaces tactiles, qui appliquent des stimulations d'amplitudes généralement beaucoup plus faibles.

1.3.2.2 Perception haptique

La *perception haptique* des objets peut être décomposée en plusieurs parties qui sont (i) la perception des contours et de la forme, (ii) la perception de la compliance (forces internes), (iii) la perception du poids (forces externes), (iv) la perception de la température et (v) la perception de l'état de surface. Notons aussi que la *perception haptique* d'un objet virtuel peut être altérée par un retour visuel (dominance visuelle) [93].

Restitution de la forme Pour la *restitution de la forme*, deux types d'objets doivent être envisagés : (1) les objets rigides et (2) les objets non rigides. La res-

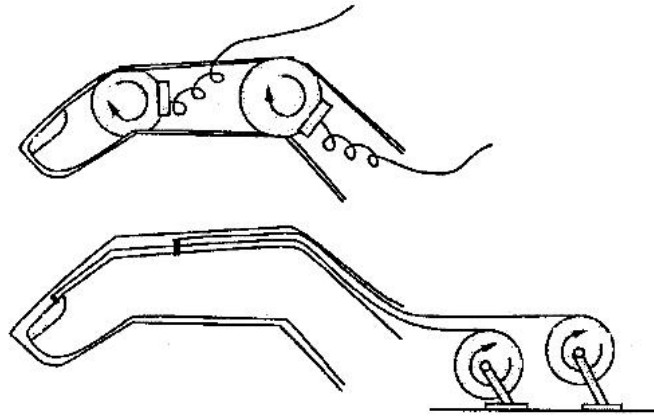


FIGURE 1.14 – Illustration des deux approches pour le placement des actionneurs d'une interface à retour d'effort.

titution de la forme d'un objet rigide peut être envisagée en utilisant un système à retour d'effort ou un système à retour tactile. Dans les deux cas, ces systèmes doivent avoir une bande passante de l'ordre du KHz.

Restitution de la compliance La *restitution de la compliance* ou capacité d'un objet à se déformer sous l'action d'une force, implique l'utilisation d'un mécanisme qui s'oppose aux mouvements de l'utilisateur. Dans ce contexte, les forces sont exercées par des actionneurs qui peuvent être placés, soit à l'endroit où les efforts doivent être appliqués, soit à distance (**Figure 1.14**) [27]. Cette dernière approche implique une transmission des efforts par câbles et donc une augmentation des frottements. Cependant, celle-ci a l'avantage de réduire le poids total ainsi que l'encombrement du système.

Restitution du poids et forces de saisie La *restitution du poids* d'un objet virtuel est un problème complexe. Elle exige l'utilisation d'une interface qui permet d'appliquer une force verticale sur la main de l'opérateur, dans un espace de travail relativement important. Plusieurs approches ont été envisagées : le poids peut être appliqué sur la main à l'aide (i) d'un exosquelette qui enveloppe tout le bras de l'opérateur [14], (ii) d'une structure mécanique liée, par exemple, à un gant à retour d'effort [27] ou (iii) d'une interface à câbles. Cette dernière approche a l'avantage d'être non intrusive, légère et offrant un grand espace de travail. Dans le contexte de la manipulation d'objets virtuels, le problème est plus complexe. En effet, il faut restituer sur chaque doigt de la main les forces de préhension (forces internes), auxquelles il faut ajouter les composantes dues au poids de l'objet.

1.3.3 Interaction multimodale

La principale difficulté liée à l'intégration d'informations multimodales (visuelle, sonore, tactile et kinesthésique) et en particulier d'informations visuo-haptiques, est la conservation de leur intégrité propre. Par exemple, l'altération du flux visuel par l'intégration intrusive d'une interface kinesthésique peut entraîner l'inverse de l'effet recherché, à savoir une dégradation de la performance de l'utilisateur.

Après avoir identifié les exigences liées à l'interaction visuelle et à l'interaction haptique, nous proposons d'analyser les contraintes liées à l'utilisation conjointe d'une interface haptique et d'un dispositif d'affichage. Nous étendons cette analyse à l'interaction multimodale, c'est à dire à l'utilisation conjointe ou successive de retours visuel, sonore, tactile et kinesthésique. Nous abordons en particulier les aspects relatifs à la substitution sensorielle liée à la restitution d'informations haptiques (kinesthésiques et tactiles).

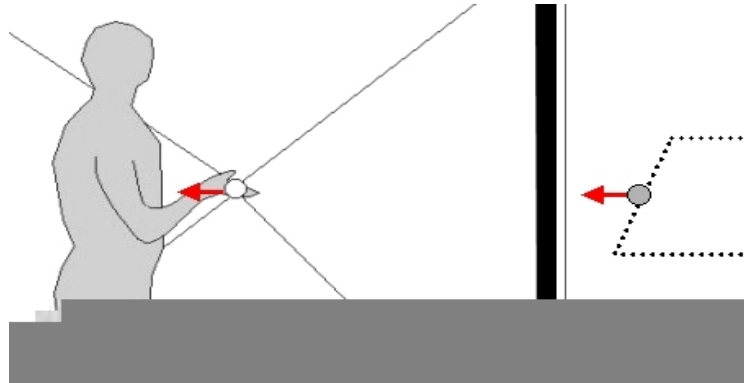


FIGURE 1.15 – Illustration d'une configuration visuo-haptique non-immersive.

1.3.3.1 Intégration visuo-haptique

Nous avons identifié trois types de configurations différents pour l'intégration d'interfaces visuelles et kinesthésiques. La première configuration (**Figure 1.15**), que nous qualifions de configuration non immersive, est basée sur le principe de la téléopération. L'opérateur manipule des objets virtuels dans un environnement 3D représenté sur un écran, éventuellement stéréoscopique. Les espaces de visualisation et de manipulation sont distincts et l'opérateur perçoit des efforts liés à des événements situés derrière (stéréoscopie positive) ou sur l'écran.

Ce type de configuration peut engendrer des difficultés dans l'exécution de mouvements qui exigent une bonne coordination visuo-motrice. Des problèmes de perception visuelle peuvent aussi survenir quand l'EV ne possède pas suffisamment d'indices visuels de profondeur. Dans ce contexte, un suivi des mouvements de la tête de l'utilisateur (head tracking) est quelquefois utilisé pour palier l'absence de vision stéréoscopique [132].

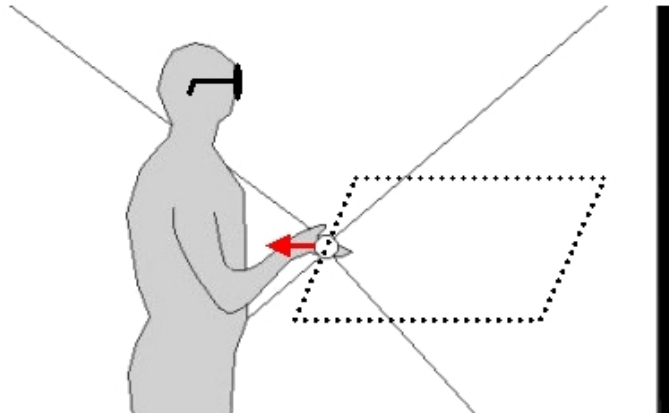


FIGURE 1.16 – Illustration d'une configuration visuo-haptique semi-immersive.

La deuxième configuration identifiée (**Figure 1.16**), que nous qualifions de configuration semi-immersive, implique un affichage stéréoscopique (stéréoscopie négative) des images devant le plan d'accommodation (écran). Nous verrons dans le chapitre suivant que plusieurs dispositifs d'affichage offrent cette possibilité. Les espaces de manipulation et de visualisation sont alors confondus, et l'opérateur ressent les forces d'interaction à l'endroit où celles-ci sont calculées. Bien que cette configuration semble très pertinente, elle soulève différents problèmes liés en particulier au caractère intrusif de l'interface haptique utilisée (altération du champ visuel, etc.). Cette configuration engendre également des incohérences perceptuelles entre l'accommodation et la convergence du regard [127]. En effet, les yeux de l'opérateur accommodent sur l'écran et convergent sur un point relativement éloigné de celui-ci. Des problèmes d'occultation peuvent également perturber l'utilisateur [110].

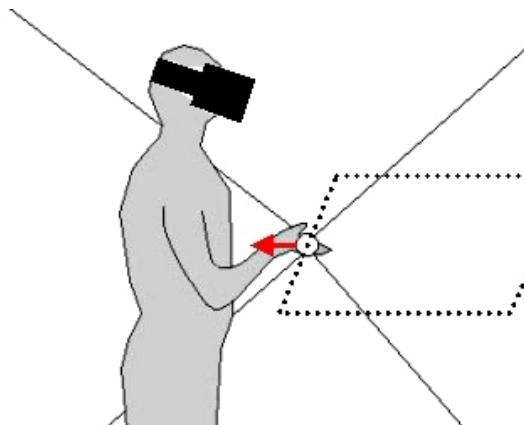


FIGURE 1.17 – Illustration d'une configuration visuo-haptique immersive.

Paljic et al [119] ont étudié l'influence de la distance entre les espaces de visualisation et de manipulation dans une tâche de pointage 3D. Les résultats indiquent qu'au delà de 20 cm, les performances commencent à diminuer : le

temps de réalisation de la tâche augmente et la précision du pointage diminue.

Enfin, la dernière configuration identifiée (**Figure 1.17**), que nous qualifions de configuration immersive, repose sur l'utilisation d'un visio-casque. L'utilisateur ne perçoit aucune information provenant de l'environnement réel. Ainsi, il ne voit ni ses mains, ni l'interface haptique qu'il manipule. Dans cette configuration, le problème de perturbation du champ de vision ne se pose pas. Cependant, outre les problèmes ergonomiques et physiologiques que nous avons analysés précédemment, l'immersion totale, via l'utilisation d'un visio-casque, soulève des problèmes de nature psychologique. Par exemple, Lok et al. [97] ont montré que l'utilisateur est plus performant lorsqu'il voit ses mains plutôt que des mains virtuelles. Comme la configuration précédente, cette configuration engendre des incohérences perceptuelles importantes entre l'accommodation et la convergence du regard. De plus, comme nous l'avons indiqué, l'utilisation d'un visio-casque réduit considérablement le champ visuel de l'utilisateur et provoque des conflits vestibulo-oculaires liés à la présence de délais.

1.3.3.2 Apports du retour haptique

L'intégration d'une interface haptique dans un EV permet généralement de diminuer la charge cognitive et d'augmenter le réalisme de la simulation [19]. Cependant, dans certains contextes d'utilisation, des études ont montré que les performances (vitesse d'exécution, précision, etc.) ne sont pas toujours améliorées par l'ajout d'informations haptiques. Par exemple, Akamatsu et al. [8] ont mis en évidence la nécessité de s'interroger sur le choix et la pertinence des informations à renvoyer à l'utilisateur lors d'une tâche. Ils ont montré que la simple utilisation d'une information binaire de contact (*retour tactile*), était quelquefois plus efficace que la génération d'un *retour d'effort* réaliste. Richard et al. [135], ont étudié la performance (vitesse d'exécution et dextérité) d'opérateurs humains lors d'une tâche de manipulation d'objets virtuels de formes différentes. La forme des objets était restituée via l'utilisation d'une interface haptique complexe (gant à retour d'effort) ou d'une interface binaire. Les résultats n'ont indiqué aucune différence entre la performance des opérateurs qui ont utilisé l'interface complexe et celle des opérateurs ayant utilisé l'autre interface. L'analyse des résultats a conduit à l'hypothèse que la richesse des informations sensorielles doit être en accord avec les attentes des utilisateurs, celles-ci étant basées sur les capacités d'entrée (nombre de ddl) de l'interface.

1.3.3.3 Substitution sensorielle

Bach-y-Rita [156] définit la *substitution sensorielle* comme la transmission au cerveau d'informations qui appartiennent habituellement à un domaine sensoriel donné à l'aide de récepteurs, voies, projections cérébrales, et aires d'intégration et de représentation d'un autre système sensoriel. La *substitution sensorielle* a plusieurs intérêts dans notre contexte. En premier lieu, elle permet de renvoyer à l'opérateur des informations de contact ou d'effort sans l'utilisation d'interface kinesthésique, augmentant ainsi son espace de travail et sa liberté de mouvement

dans l'EV. La *substitution sensorielle* permet également de renforcer la perception d'informations haptiques via la transmission conjointe d'informations visuelles, sonores ou tactiles. Enfin, elle permet d'ouvrir la boucle sensori-motrice et ainsi d'éviter les problèmes d'instabilité du système en cas de délais (EVs distribués). Cette caractéristique est d'autant plus intéressante que lorsque les délais sont trop importants, l'utilisation d'interfaces haptiques est impossible [49, 13, 34]. Lorsque les délais sont relativement limités, l'utilisation d'informations visuelles ou sonores permet d'aider l'opérateur à anticiper le retour d'effort et à mieux contrôler ses mouvements de préhension [125].

Un des premiers systèmes de réalité virtuelle (voir **Figure 2.6 (b)** du chapitre suivant) utilisant la *substitution sensorielle*, a été développé par Ouh-Young et al. [113]. Ce système était basé sur une configuration non-immersive. L'interface à retour d'effort était utilisée pour générer des forces provenant d'interactions moléculaires. Des expérimentations ont indiqué que bien que le retour d'effort améliorerait la compréhension et la performance des opérateurs, l'utilisation de la *substitution sensorielle* (substitution du *retour d'effort* par un retour *visuel* ou *auditif*) permettait de renforcer ou de compléter les informations haptiques. Massimino et al. [102] ont étudié différentes tâches du type "peg in a hole" dans le cadre de la téléopération. Plusieurs types de retours sensoriels ont été fournis à l'utilisateur lorsqu'une collision entre l'objet manipulé et le reste de l'environnement avait lieu. La *substitution sensorielle* proposée consistait à restituer, via un retour *vibro-tactile* appliqué aux différentes parties de la main du sujet (paume, pouce, index), la *force* réelle mesurée par les capteurs situés sur l'effecteur. Les résultats obtenus ont indiqué que la performance de l'utilisateur était identique pour les deux types de retours d'information. Les résultats ont également révélé que la *substitution sensorielle* pouvait provoquer une surcharge du canal visuel et ainsi provoquer une diminution de la performance.

Dans le cadre de l'étude de l'interaction multisensorielle en EV, Richard et al. [134] ont comparé l'influence de retours d'effort, visuel et auditif dans une tâche impliquant la manipulation d'objets virtuels. Les retours d'effort étaient appliqués sur les doigts de l'utilisateur via le Rutgers Master I (voir **Figure 2.14** du chapitre suivant). Il était demandé aux sujets de manipuler successivement deux balles de différentes compliances et de les déformer dans la limite de 10% de leur rayon. Les résultats ont révélé que les sujets étaient aussi performants avec un retour sonore qu'avec un retour d'effort sur les doigts.

Dans le même contexte, Richard et al. [128] ont étudié la performance d'opérateurs humains dans une double tâche impliquant la saisie, le déplacement, la dépose (pick-and-place) et la déformation manuelle d'une balle virtuelle. L'utilisation d'une station graphique de dernière génération permettait une visualisation stéréoscopique via l'utilisation de lunettes LCD. Les forces virtuelles relatives à la déformation de la balle étaient restituées via (1) le Rutgers Master I (retour d'effort), un affichage *visuel*, ou un retour *sonore*. Les résultats ont montré que le retour d'effort permettait d'augmenter la performance et de réduire le taux d'erreur. Cependant, le remplacement du *retour d'effort* par un retour *visuel* ou *auditif* a conduit à des résultats similaires. Les meilleurs résultats ont été obtenus

nus lors de l'utilisation conjointe de l'interface haptique (*retour d'effort*) et d'un retour *visuel* ou *auditif*. L'hypothèse avancée par Richard et al. est que, contrairement au *retour d'effort*, ces retours informationnels, disponibles dès le début de la phase de saisie de l'objet, ont permis à l'utilisateur d'anticiper et donc de mieux contrôler les forces de saisie. Dans le cas du *retour visuel*, une surcharge du canal visuel a été mise en évidence.

Plus récemment, Lécuyer et al. [94] ont étudié l'influence de retours d'informations haptique, visuelle et auditive sur les performances d'opérateurs humains, lors d'une tâche d'insertion réalisée sur une configuration semi-immersive. La tâche proposée consistait à insérer une balle à travers cinq ouvertures sur cinq surfaces différentes. Les résultats ont montré, qu'en présence du *retour d'effort*, les opérateurs étaient plus concentrés sur la bonne réalisation de la tâche que sur la vitesse d'exécution. Le *retour d'effort* renvoyé sur la main de l'opérateur via une poignée articulée, a été très apprécié par les sujets.

Bergamasco et al. [14] ont proposé l'utilisation d'indicateurs visuels (flèches) permettant à l'opérateur d'estimer les forces de prise lors de la manipulation d'objets virtuels. Les essais effectués ont montré que ces indicateurs étaient relativement efficaces. Patrick [120] a utilisé un indicateur visuel (icônes situées dans une partie de l'écran), qui permettait à l'opérateur de connaître la localisation respective de chaque doigt de la main par rapport à un objet virtuel. L'opérateur pouvait ainsi connaître la distance qui séparait ses doigts de la surface de l'objet.

Dans le cadre de la conception industrielle, Diaz et al. [39] ont étudié les avantages que les systèmes multi-sensoriels pouvaient fournir dans des tâches d'accessibilité. Il ont en particulier étudié l'amélioration apportée par un *retour auditif* sur la performance de l'utilisateur. Les participants devaient effectuer une tâche d'accessibilité à l'aide de différentes combinaisons de stimuli sensoriels. Une interface haptique a été couplée, en temps réel, à un *retour auditif*. Les résultats ont indiqué que les stimuli auditifs permettaient à l'opérateur d'anticiper et de corriger ses trajectoires.

Dans le contexte de l'exploration de données scientifiques, Brederson et al. [24] ont étudié les apports d'un *retour haptique* combiné à un *retour visuel* dans un environnement virtuel semi-immersif. L'immersion a été renforcée par un suivi temps réel des mouvements de tête (head tracking). Les résultats ont indiqué que la visualisation combinée à un *rendu haptique* permettait de transmettre les principales caractéristiques des données scientifiques, le *retour visuel*, apportant peu dans ce cas.

1.4 Conclusion

Après une définition et une classification des différents types de prototypes, nous avons examiné les limites et les contraintes liées au prototypage réel. Puis nous avons fait état des apports et des limitations du prototypage virtuel, en traitant plus particulièrement les phases de création et de validation. Nous avons ensuite analysé les contraintes et les exigences de l'interaction avec des prototypes

en environnement virtuel. Celles-ci ont été classées selon des critères ergonomiques, physiologiques et psychologiques. L'interaction visuelle ou visuo-motrice et l'interaction haptique ont été traitées séparément. Enfin, nous avons étudié les contraintes spécifiques liées à l'interaction multimodale et visuo-haptique, en particulier.

En ce qui concerne l'interaction visuelle, nous avons identifié plusieurs exigences liées en particulier (1) à la perception visuelle de la profondeur, (2) à la résolution temporelle des images, et (3) aux décalages spatio-temporels entre les mouvements de l'utilisateur et leur restitution visuelle. Les exigences liées à la perception visuelle de la profondeur préconisent l'utilisation d'indices visuels pertinents, permettant à l'utilisateur d'interagir de manière efficace avec les prototypes virtuels. Dans ce contexte, la résolution temporelle des images et plus particulièrement la fréquence de rafraîchissement des images (réactualisation de la scène) doit être suffisante et doit correspondre au type de tâche envisagée et au dispositif d'affichage utilisé. Enfin, les décalages spatio-temporels doivent être relativement limités afin que l'utilisateur puisse contrôler ses gestes et actions dans l'environnement virtuel.

Concernant l'interaction haptique, nous avons en particulier identifié les contraintes et exigences liées (1) à l'ergonomie des interfaces haptiques et à leurs caractéristiques fonctionnelles (résolution en effort, bande passante, etc.), et (2) à la perception des objets virtuels (géométrie, poids, compliance, etc.).

Concernant l'interaction visuo-haptique et plus généralement multimodale, nous avons identifié trois types d'approche pour l'intégration d'interfaces visuelles et kinésthésiques. Puis, nous avons analysé l'apport du retour haptique dans les différentes configurations identifiées. Enfin, nous avons décrit différentes expérimentations basées sur l'utilisation de la *substitution sensorielle*.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons les différents dispositifs d'affichage et interfaces haptiques utilisés en réalité virtuelle. Puis, nous présenterons les configurations visuo-haptiques existantes. L'étude relativement exhaustive des exigences de l'interaction visuelle, haptique et visuo-haptique que nous avons effectuée nous permettra une analyse critique et constructive de ces configurations.

Chapitre 2

Interfaces et environnements visuo-haptiques

2.1 Introduction

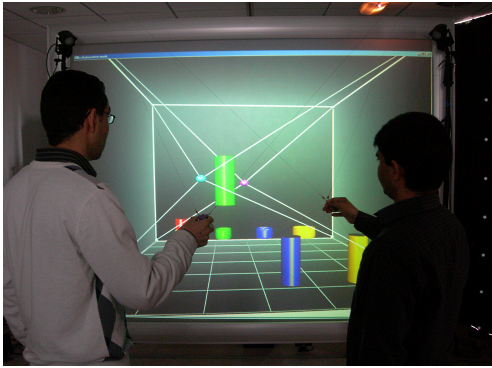
La *réalité virtuelle (RV)* est une technologie de systèmes faisant appel aux notions d'interactivité et d'immersion dans des mondes synthétiques. Par l'utilisation de stations graphiques à hautes performances, couplées à des interfaces et périphériques d'interaction hautement expressifs, on cherche à fournir à l'opérateur les moyens d'interagir de manière efficace avec ces mondes. Ainsi, les techniques d'interaction mises en oeuvre sont basées sur les capacités naturelles d'action (fonction ergodique), de perception (fonction espithémique), et de communication (fonction sémiologique) de l'homme. Le choix des interfaces et périphériques n'est pas toujours aisé, et devrait en principe être lié au type d'application envisagé. Cette difficulté est encore plus importante lorsqu'il s'agit de développer une configuration visuo-haptique intégrant de manière efficiente une interface à retour d'effort et un dispositif d'affichage. Dans ce chapitre, nous décrivons les différents dispositifs d'affichage utilisés en réalité virtuelle. Puis, nous proposons un état de l'art des interfaces haptiques, en analysant séparément les interfaces kinesthésiques (retour d'effort) et tactiles. Enfin, nous présentons et analysons les principales configurations visuo-haptiques existantes, et identifions les plus adaptées à notre problématique.

2.2 Interfaces visuelles

Parmi les différents retours sensoriels impliqués dans l'interaction et l'immersion d'un utilisateur dans un monde virtuel, le retour visuel occupe une place prépondérante. Au cours des deux dernières décénies, différents dispositifs d'affichage ou interfaces visuelles, plus ou moins immersifs, ont été développés. Certains d'entre eux sont associés à la *réalité augmentée (RA)*, mais ils présentent un fort potentiel pour le prototypage virtuel. Les dispositifs d'affichage peuvent être classés en deux catégories :

- Les **configurations immersives**, dont l'objectif est (1) d'immerger un utilisateur dans un environnement virtuel (EV) par le biais d'un affichage stéréoscopique, ou (2) d'intégrer des entités (images, objets, etc.) virtuelles dans le monde réel (RA). Certaines configurations immersives n'impliquent pas un recouvrement total du champ visuel de l'utilisateur (mur, plan de travail ou workbench).

- Les **configurations non-immersives** qui permettent de visualiser des entités virtuelles dans le monde réel (RA) ou dans un monde virtuel, au travers d'un dispositif d'affichage de faible dimension tel qu'un écran LCD [77]. L'utilisateur voit alors le monde à travers "une fenêtre" représentée par l'écran. Ce type de configuration peut aussi impliquer une visualisation stéréoscopique, quelquefois renforcée par un suivi des mouvements de la tête.



(a)



(b)

FIGURE 2.1 – Exemples de configurations immersives : (a) mur immersif et (b) dôme immersif.

2.2.1 Configurations immersives

Les *configurations immersives* utilisent les interfaces visuelles décrites dans les paragraphes suivants. Celles-ci sont principalement utilisées pour des applications de RV. Toutefois, certaines d'entre elles (visio-casques) peuvent également être employées dans le cadre de la RA.

2.2.1.1 Les murs

Les *murs immersifs* sont constitués d'un écran plan de grande dimension sur lequel les images sont rétro-projetées (**Figure 2.1 (a)**). La visualisation, généralement stéréoscopique, est basée sur l'utilisation de filtres polarisants (linéaires ou circulaires) et de lunettes passives permettant de séparer les images pour l'oeil gauche de celles pour l'oeil droit [76].

2.2.1.2 Les dômes

Un *dôme* est un écran de surface héli-sphérique sur lequel sont projetées les images (**Figure 2.1 (b)**). Le principal avantage de cette configuration est de proposer une surface de projection non plane permettant d'accroître l'immersion de l'utilisateur via un recouvrement plus important de son champ visuel [42].

2.2.1.3 Les salles

Dans le cadre de la conception de produits, les *salles* immersives permettent une visualisation en groupe de travail (plateaux virtuels). Le principal avantage de cette configuration tient à sa taille qui permet l'observation de maquettes virtuelles de grandes dimensions (**Figure 2.2 (a)**).

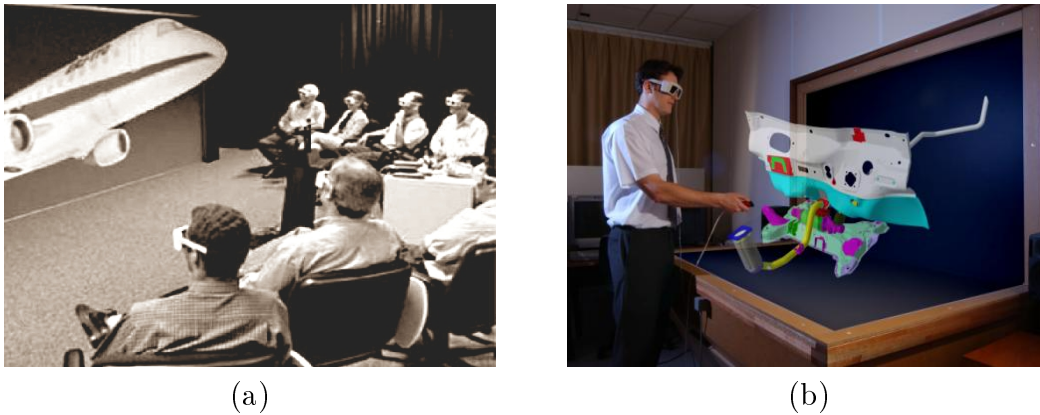


FIGURE 2.2 – Exemples de configurations immersives : (a) salle immersive et (b) plan de travail ou *workbench*.

2.2.1.4 Les plans de travail

Les *plans de travail* (ou *workbenches*) permettent une visualisation stéréoscopique et une manipulation intuitive de maquettes virtuelles de dimensions moyennes [119, 58, 94]. Ces dispositifs d'affichage sont équipés d'un ou deux écrans rétroprojetés et nécessitent l'utilisation de lunettes (**Figure 2.2 (b)**).

2.2.1.5 Les visiocubes

Les *visiocubes* sont des enceintes cubiques possédant quatre à six écrans orthogonaux de grandes dimensions (environ 3 mètres de côté). Les images stéréoscopiques sont également rétroprojetées (**Figure 2.3 (a)**). Dans la configuration à 6 écrans, le champ visuel de l'utilisateur est totalement recouvert et celui-ci n'a plus aucun repère issu du monde réel. Le CAVETM [36], le RaveTM [1], le SAS CubeTM [107], le MoVETM ou l'I-SpaceTM de PSA Peugeot Citroën, sont probablement les visiocubes les plus connus. Ces systèmes sont onéreux, difficiles

à mettre en oeuvre et à maintenir. En outre, l'utilisation prolongée de lunettes stéréoscopiques en situation totalement immersive peut provoquer des problèmes physiologiques (nausée, perte d'équilibre, etc.) ainsi que des effets secondaires non négligeables.

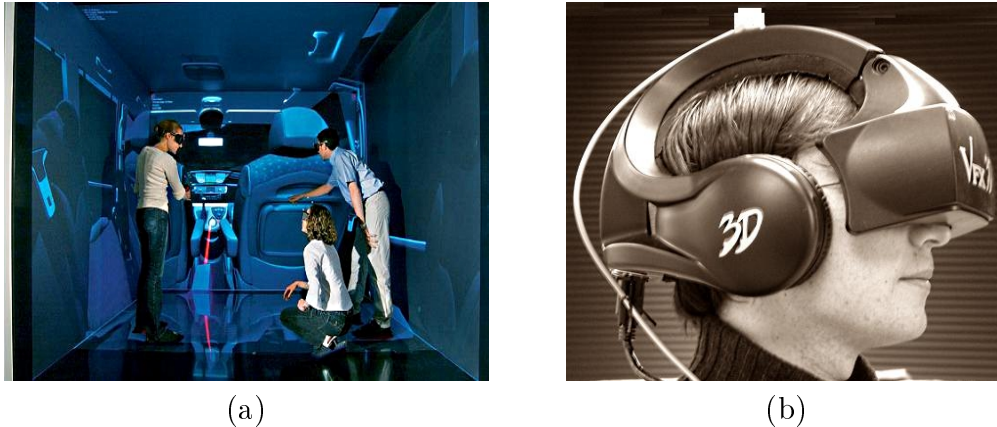


FIGURE 2.3 – Exemples de configurations immersives : (a) visiocube et (b) visio-casque.

2.2.1.6 Les visio-casques

Les *visio-casques*, également appelés *casques immersifs* ou *HMD* (Head-Mounted-Display), offrent un affichage monoscopique ou stéréoscopique des images et un suivi en temps réel de l'orientation de la tête de l'utilisateur. Le principal avantage de ce type de dispositif est lié à son fort potentiel d'immersion dans l'environnement virtuel (**Figure 2.3 (b)**). Toutefois, comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, le champ visuel proposé par les visio-casques est encore relativement limité. Certains modèles récents offrent cependant un champ visuel accru. En outre, comme pour les visiocubes, l'utilisation prolongée de ce type de système peut provoquer des problèmes physiologiques ainsi que des effets secondaires non négligeables. Dans le cadre de la RA, deux approches peuvent être envisagées :

- les *visio-casques immersifs* (*video see-through HMD*) pour lesquels un mélange entre les images synthétiques et le flux vidéo provenant d'une caméra embarquée est réalisé avant d'être présenté à l'utilisateur (Figure 2.4 (a)) [41],
- les *visio-casques semi-transparentes* (*optical see-through HMD*) constitués d'un écran semi-transparent permettant de superposer les images virtuelles au monde réel. Le mixage réel/virtuel est alors réalisé directement par l'utilisateur (Figure 2.4 (b)) [148].

- le *dispositif d’affichage sur la rétine (retinal display)* qui projette les images synthétiques directement sur la rétine grâce à une technologie laser de faible puissance. Ces dispositifs permettent d’avoir une très bonne luminosité en utilisant très peu d’énergie. Cependant, ces dispositifs sont encore peu utilisés dans des applications industrielles pour des raisons de sécurité.

La principale difficulté liée à l’utilisation de visio-casques en RA est la cohérence spatio-temporelle des images réelles et virtuelles [12].

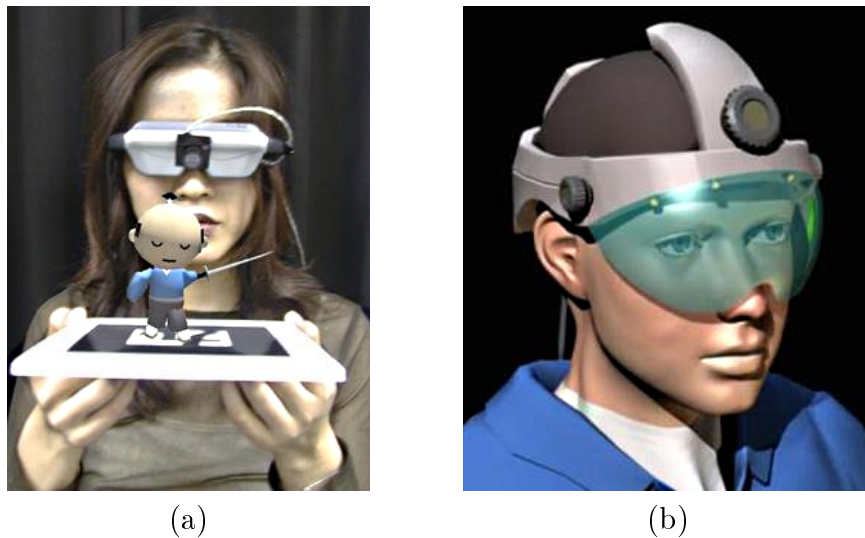


FIGURE 2.4 – Exemples de visio-casques utilisés en RA : (a) visio-casque immersif (*video see-through HMD*) [41] et (b) visio-casque semi-transparent de dernière génération (*Optical see-through HMD* conçu par Physical Optics Corporation [35]).

2.2.2 Configurations non-immersives

Les *configurations non-immersives* affichent les images synthétiques sur un écran (moniteur LCD). Ce type de configuration est une alternative intéressante pour la visualisation et l’interaction avec des maquettes virtuelles de dimensions moyennes. Ainsi, la mise sur le marché d’écrans plats LCD de grandes tailles (éventuellement stéréoscopiques) permet d’envisager des configurations bas coût pour des applications de prototype virtuel.

Ce type de configuration peut donner lieu à une interaction *non co-localisée* dans laquelle un décalage spatial entre les espaces de visualisation et d’interaction existe (**Figure 2.5 (a)**), ou à une interaction *co-localisée* (**Figure 2.5 (b)**), permettant une cohérence spatio-temporelle entre les images stéréoscopiques et le retour haptique [124].

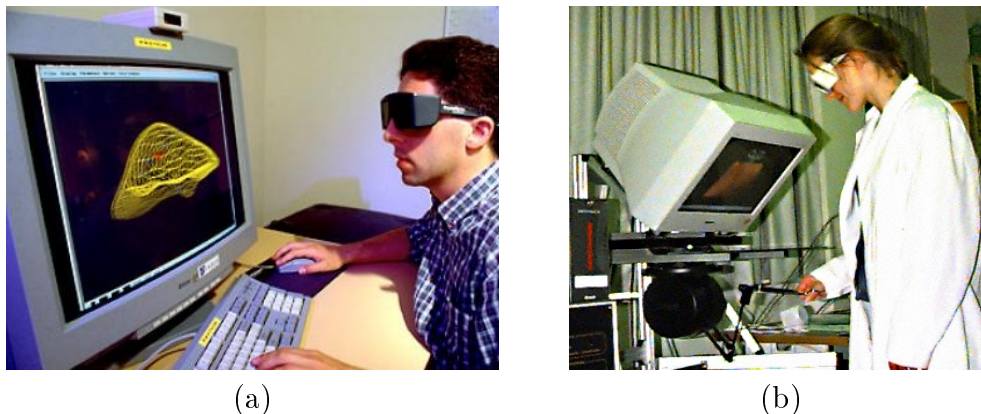


FIGURE 2.5 – Exemples de configurations non-immersives : (a) interaction non co-localisée et (b) interaction co-localisée.

2.3 Interfaces haptiques

Les interfaces *haptiques* permettent (1) de contraindre ou d'assister l'utilisateur lors de la réalisation d'une tâche simulée ou distante ou (2) d'appliquer des stimuli tactiles sur la main ou toute autre partie du corps de celui-ci. Ainsi, les interfaces *haptiques* sont classées en deux catégories : les interfaces à *retour d'effort* et les interfaces à *retour tactile*. Dans les paragraphes suivants, nous proposons un état de l'art des interfaces à *retour d'effort*. Puis nous abordons plus succinctement les interfaces à *retour tactile*.

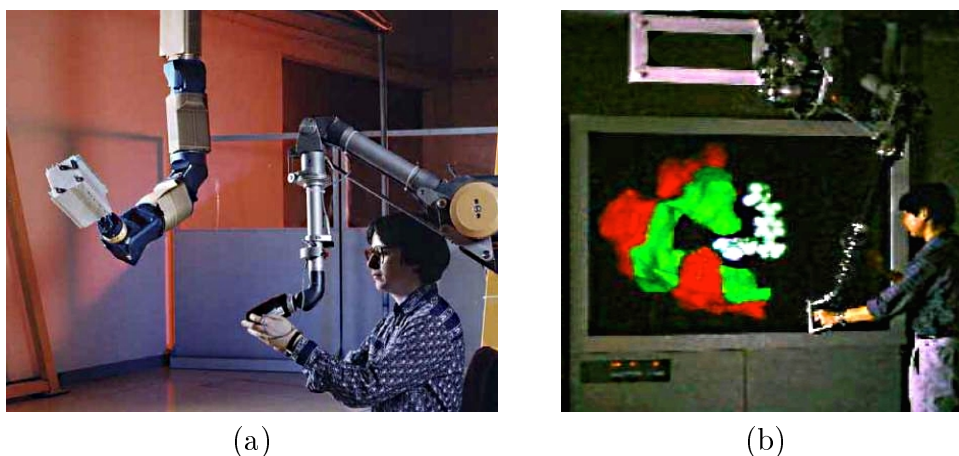


FIGURE 2.6 – Exemples d'interfaces à retour d'effort : (a) système maître-esclave développé au CEA pour la télé-manipulation et (b) dispositif maître utilisé dans le cadre de simulations de docking moléculaire (Projet GROPE).

2.3.1 Interfaces à retour d'effort

Les *interfaces à retour d'effort* ont initialement été employées dans le cadre de la téléopération. Le but était alors de donner à l'opérateur les moyens d'effectuer des tâches à distance dans des environnements contaminés ou inaccessibles. La (**figure 2.6 (a)**) illustre un exemple de système maître-esclave développé au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) [153]. Par la suite, les interfaces à retour d'effort ont été utilisées pour l'interaction avec les environnements virtuels [26]. Un des premiers exemples, illustré sur la (**figure 2.6 (b)**), a été développé en 1990 aux États-Unis à l'université de Caroline du Nord (projet GROPE).

2.3.2 Classification

Différents critères pour la classification des *interfaces à retour d'effort* ont été proposés. Par exemple, Hayward [63] a classé les interfaces selon leur nombre de degrés de liberté (ddl). Bergamasco [14] a proposé une approche en ne prenant en compte que la nature du contact entre l'opérateur et l'interface. Il a alors considéré cinq grandes catégories d'interfaces : (1) les interfaces de type manette de jeu, (2) les interfaces à un seul point de contact, (3) les interfaces pour la réplication de tâches, (4) les interfaces à plusieurs points de contact et (5) les interfaces portables.

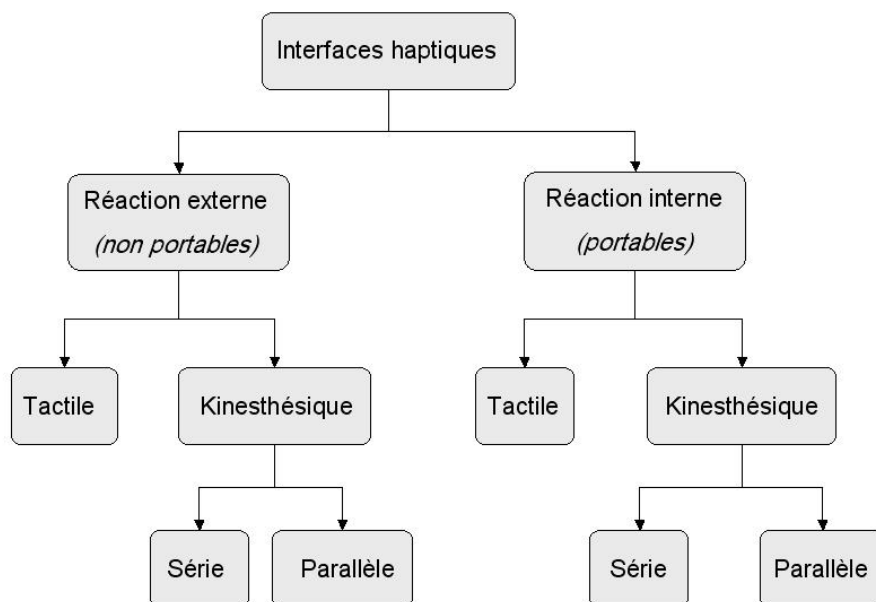


FIGURE 2.7 – Classification des interfaces haptiques.

La classification sur laquelle nous nous appuyons est basée sur le type d'architecture mécanique utilisé et sur le référentiel par rapport auquel sont appliquées les forces. Dans cette classification, les interfaces à retour d'effort sont séparées

en deux grandes familles : les *interfaces à réaction externe*, et les *interfaces à réaction interne* (**Figure 2.7**). Pour les *interfaces à réaction externe* la chaîne cinématique se referme sur un socle fixe. Cette approche donne la possibilité de compenser le poids de l'interface et de contraindre ou d'assister les mouvements de l'utilisateur. Cependant, l'espace de travail de ce type d'interface est souvent limité.

En ce qui concerne les *interfaces à réaction interne*, la chaîne cinématique se referme sur l'opérateur. Ces interfaces offrent une plus grande liberté de mouvement, mais leur poids n'est pas compensable, ils doivent donc être relativement légers. Notons que les interfaces à retour tactile sont présentes dans la classification proposée pour les interfaces haptiques. En effet, il existe des interfaces à retour tactile portables et non-portables.

Un aspect relativement important des interfaces à retour d'effort est lié à leur caractère *actif* ou *passif*. Les systèmes à retour d'effort passif n'ajoutent pas d'énergie cinétique au système et sont seulement capables de réduire, stocker ou rediriger l'énergie mécanique fournie par l'opérateur. Il peut s'agir de freins, d'amortisseurs, ou tout autre système capable de transformer l'énergie mécanique fournie en énergie thermique [144]. Ce type d'interface comporte des moteurs ou des actionneurs dont la seule fonction est le freinage ou l'amortissement des mouvements de l'opérateur.

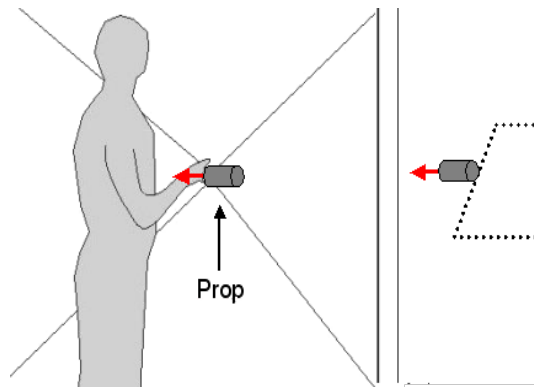


FIGURE 2.8 – Illustration d'un opérateur utilisant un prop.

Il est quelquefois intéressant d'utiliser des accessoires ou objets tangibles (props) pour un retour d'effort localisé à la main de l'opérateur. Les props permettent à l'utilisateur d'agir intuitivement sur un objet virtuel en manipulant l'objet tangible associé (**Figure 2.8**). Une des premières utilisations de props fut proposée en 1994 par Hinckley [66] dans le cadre d'une application de neurochirurgie permettant de manipuler un cerveau virtuel grâce à une tête de poupée réelle tenue en main. Dans l'autre main, une petite plaque en plexiglas, reliée à un capteur de mouvement, permettait de manipuler avec précision un plan de coupe sur la représentation 3D du cerveau. Cependant, la limite de cette approche réside dans le fait qu'un prop est spécifique à une tâche et correspond en général à un objet ou un type d'objet bien défini.

2.3.2.1 Interfaces à réaction externe

Dans cette catégorie, les interfaces possèdent une base fixe ou indépendante de l'utilisateur. Le contact de l'utilisateur avec l'interface se fait par le biais d'un effecteur final. La structure de l'interface est de type série, parallèle ou hybride. L'effecteur final comprend un préhenseur avec un seul point de contact ou un gant d'exosquelette pour l'utilisateur. Puisque la structure de ces interfaces est fixée sur une base, l'utilisateur pourra sentir une grande rigidité sans être trop gêné par le poids et l'inertie du système.

Structures séries La solution la plus simple pour l'application de forces sur la main de l'opérateur repose sur l'utilisation d'une structure mécanique série. Les interfaces haptiques à structure série les plus connues ont été développées par l'entreprise Sensable Technologie [2]. La première, le *PHANToM 1.0TM*, a été commercialisée en 1993. Il en existe cinq modèles différents avec des espaces de travail plus ou moins importants. Une des plus petites interfaces, le *PHANToM DesktopTM*, offre 3 degrés de liberté (ddl) en sortie pour un espace de travail de $16 \times 13 \times 13 \text{ cm}^3$. La plus évoluée de la gamme est le *PHANToM 6.0TM* qui possède jusqu'à 6 ddl en sortie pour un espace de travail de $19.5 \times 27 \times 37 \text{ cm}^3$. Une interface relativement originale a été proposée par l'entreprise hollandaise FCS Control System. Cette interface, le *Haptic MasterTM*, possède un espace de travail plus étendu, illustré sur la **figure 2.9(a)**.

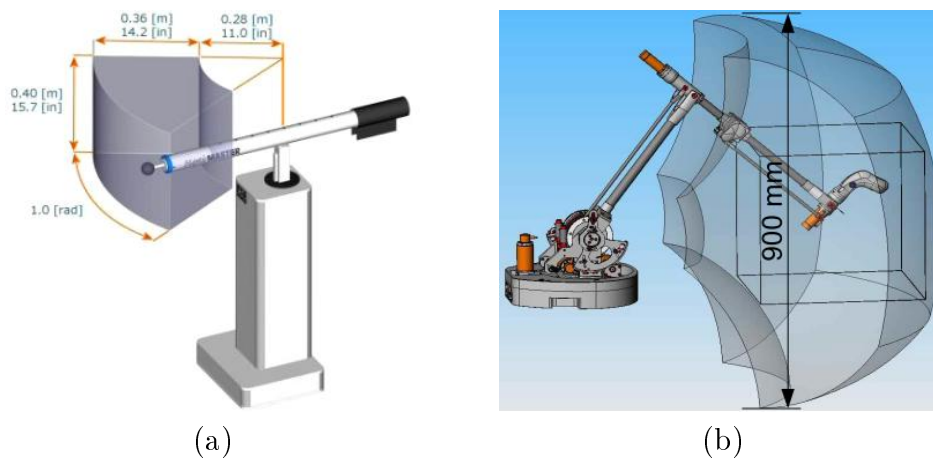


FIGURE 2.9 – Exemples d'interfaces haptiques à structure mécanique série : (a) le *Haptic MasterTM* et (b) le *VirtuoseTM 6D35-45*.

Une autre interface à structure série, très utilisée dans le cadre du prototypage virtuel est le *VirtuoseTM*. Cette interface, initialement développée par le CEA LIST, est commercialisée dans plusieurs configurations par la société Haption [3]. Le *VirtuoseTM 3D15-25* combine un retour d'effort selon 3 axes avec une force maximale de 15 N dans un espace de travail sphérique de diamètre 250 mm. La version *6D35-45* dispose de 6 ddl et peut appliquer une force maximale de 35 N

dans un espace de travail sphérique de diamètre 450 mm (**Figure 2.9 b**) [23].

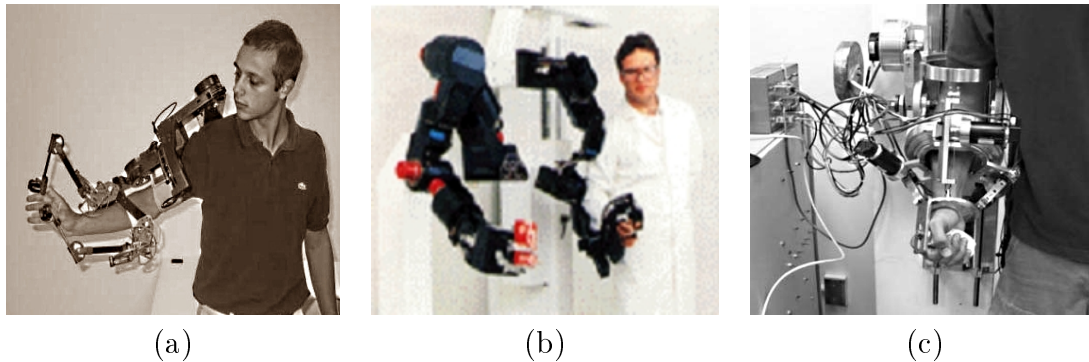


FIGURE 2.10 – Exemples d'exosquelettes : (a) le *L-Exos*, (b) le *Sarcos Dexterous Arm Master*TM et (c) le MAUI 5ddl.

Des interfaces haptiques à structure série permettant d'appliquer des efforts sur différents degrés de liberté du bras de l'opérateur ont été proposées. Ce type d'interfaces, appelé exosquelette, est plus ergonomique mais aussi plus complexe à mettre en oeuvre. Le système *L-Exos* à 5 ddl, illustré sur la **figure 2.10 (a)** a été développé par Frisoli et al. [50]. Ce système propose un espace de travail très proche de celui du bras humain. Sa structure en fibres de carbone lui confère une grande légèreté.

La société américaine Sarcos a développé différents types d'exosquelettes. Le plus connu est le *Sarcos Dexterous Arm Master*TM qui utilise des actionneurs hydrauliques. Cet exosquelette permet un retour d'effort sur l'avant bras, le poignet et trois doigts de la main (**Figure 2.10 (b)**). Sa simplicité d'utilisation pour manipuler des objets virtuels a été démontrée par Maekawa et Hollerbach [98]. Sledd et O'Malley [142] ont développé récemment une nouvelle version de leur exosquelette *MAUI* (**Figure 2.10 (c)**). Cette version offre 5 ddl et un couple plus important que la version précédente.

Structures parallèles Les interfaces haptiques à structure mécanique parallèle présentent des avantages considérables. Plusieurs interfaces haptiques à base fixe ont été conçues avec cette architecture qui permet de limiter l'inertie propre du système et ainsi le rendre plus transparent. Cependant, l'espace de travail de ce type d'interfaces est, à dimensions égales, moins étendu que celui d'une structure série. De plus, les points de singularité sont exclus de l'espace de travail [51].

L'interface haptique *SHaDe*, illustrée sur la **figure 2.11 (a)**, est une interface à structure parallèle proposant 3 ddl, développée au Laboratoire de Robotique de l'université de Laval (Canada). Elle est de conception relativement simple et possède plusieurs avantages [15].

Une autre interface haptique à structure parallèle, illustrée sur la **figure 2.11 (b)** est le *Delta*TM, conçu par l'école polytechnique de Lausanne (Suisse). Plusieurs

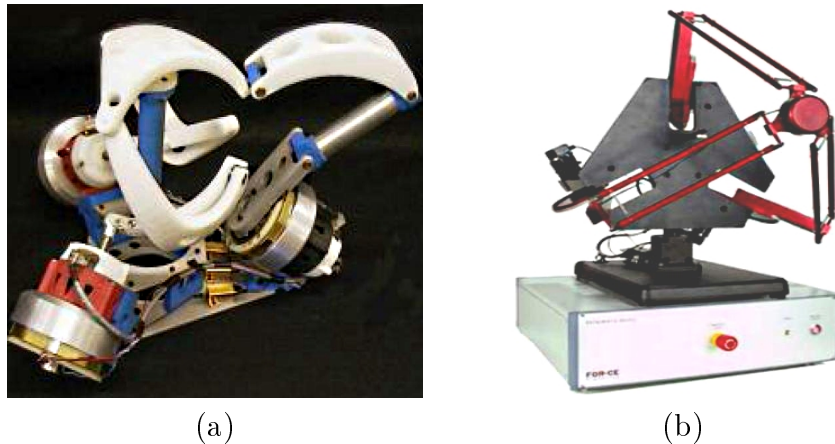


FIGURE 2.11 – Exemples d'interfaces haptiques à structure parallèle : (a) le *SHaDe* et (b) le *DeltaTM*.

versions (3 ou 6 ddl) du *DeltaTM* sont disponibles. Une interface semblable au *DeltaTM* a été réalisée à l'université Tohoku (Japon). Des réducteurs "harmonic drives" et un capteur de force à 6ddl ont été utilisés pour en augmenter les performances [159].

Les interfaces à câbles L'interface à câbles la plus connue est le *SPIDAR* (SPace Interface Device for Artificial Reality) inventé en 1989 au Tokyo Institute of Technology par Makoto Sato. Différentes versions ont été développées : le *SPIDAR I* [67], le *SPIDAR II* [78], le *Networked SPIDAR* [79], le *Scalable SPIDAR* [18], les *SPIDAR G* [83], le *SPIDAR 4+4* [158] et le *SPIDAR H* [60]. Toutes ces versions sont basées sur l'utilisation de moteurs placés aux sommets d'une structure métallique, et reliés au préhenseur par des câbles. La première version (*SPIDAR I*), illustrée à la **figure 2.12 (a)**, fournit un retour d'effort sur un point (extrémité du doigt) et utilise 4 moteurs et 4 câbles [67]. La première version du *SPIDAR I* était passive (utilisation de freins magnétiques). Le *SPIDAR II*, illustré sur la **figure 2.12 (b)** utilise 8 moteurs pour fournir un retour d'effort sur deux doigts, permettant ainsi de simuler la saisie d'un objet [78].

L'avantage principal de ces interfaces est (1) de pouvoir augmenter le nombre de degrés de liberté en ajoutant des moteurs, et (2) d'élargir l'espace de travail en les déplaçant. Un autre avantage est qu'aucune structure mécanique n'est requise. D'autres interfaces à câbles ont été développées par Williams à l'université de l'Ohio. Par exemple, l'interface *CSHI* (Cable Suspended Haptic Interface) utilise 8 câbles pour un retour d'effort sur 6 ddl [75]. Au Fukuoka Institute of Technology (Japon), Kino et al. [45] ont développé un système à structure série très performant, actionné par un ensemble de câbles formant une structure parallèle. Ce système hybride associe les avantages des mécanismes séries et des mécanismes parallèles (espace de travail, rapidité, sécurité).

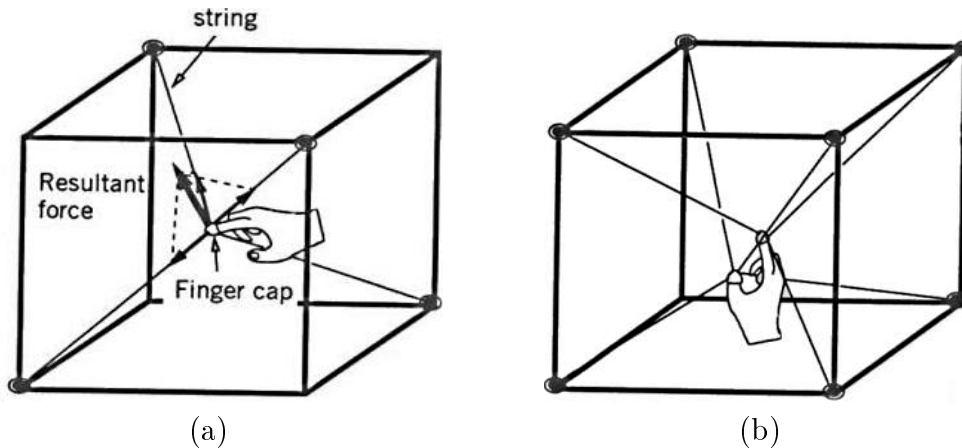


FIGURE 2.12 – Exemples d’interfaces haptiques à câbles : (a) le *SPIDAR I* et (b) le *SPIDAR II*.

2.3.2.2 Interfaces à réaction interne

La seconde catégorie d’interfaces, dites interfaces à *réaction interne* (portables), regroupe toutes les interfaces à retour d’effort portées par l’utilisateur. Ces interfaces offrent une grande liberté de mouvement. Cependant, elles ne peuvent pas simuler les forces externes (poids des objets, etc.). En outre, leur poids ne peut pas être compensé, et doit donc être faible. Comme nous l’avons vu dans le chapitre précédent, deux approches sont possibles pour l’emplacement des actionneurs : ceux-ci sont directement placés sur l’interface haptique, ou à distance et ne sont alors pas supportés par l’opérateur. Les interfaces à réaction interne peuvent être classées en trois catégories décrites ci-après.

Gants à retour d’effort Ce type d’interfaces a été développé pour mesurer la flexion des doigts de la main de l’utilisateur et appliquer un retour d’effort sur chacun d’entre eux. Par exemple, le *Master Hand* (**Figure 2.13 (a)**), développé au Japon par Koyama et al. [87], est un gant à retour d’effort de type exosquelette. Il permet de mesurer la position des extrémités de trois doigts et offre un retour d’effort passif sur 12 ddl. Une interface haptique (*Panos*) moins complexe a été développée en 2003 au Centre de Robotique de l’Ecole des Mines de Paris (**Figure 2.13 (b)**). L’architecture de ce système est composée de deux mécanismes séries : un pour le pouce (4 ddl), l’autre pour l’index (3 ddl). Afin d’avoir un retour d’effort permettant de simuler le poids des objets manipulés, il y a été intégré à un *VirtuoseTM* 6D [145]. Dans le cadre du projet européen *MUVII*, Gosselin et al. [55] ont proposé un exosquelette (*WHIPFI*) proposant un retour d’effort sur deux doigts (**Figure 2.13 (c)**). Comme l’interface haptique *Panos*, elle est composée de deux sous-mécanismes fixés sur l’avant bras. Chaque sous-mécanisme possède 6 ddl dont 3 sont actionnés par les moteurs. Un autre gant de type exosquelette est le *CyberGraspTM*. Ce gant a été développé par l’entreprise américaine ImmersionTM et fut le premier exosquelette commercialisé. Il est capable d’appliquer un retour d’effort de 12 N, perpendiculaire à chaque extrémité des 5 doigts de la main

(Figure 2.13 (d)). Le système pèse 500 g. La flexion des phalanges est enregistrée via le gant de données *CyberGloveTM* qui permet de mesurer 22 ddl. Afin de permettre au système de simuler des efforts de gravité, un bras maître à 6 ddl (le *CyberForceTM*) a été développé.

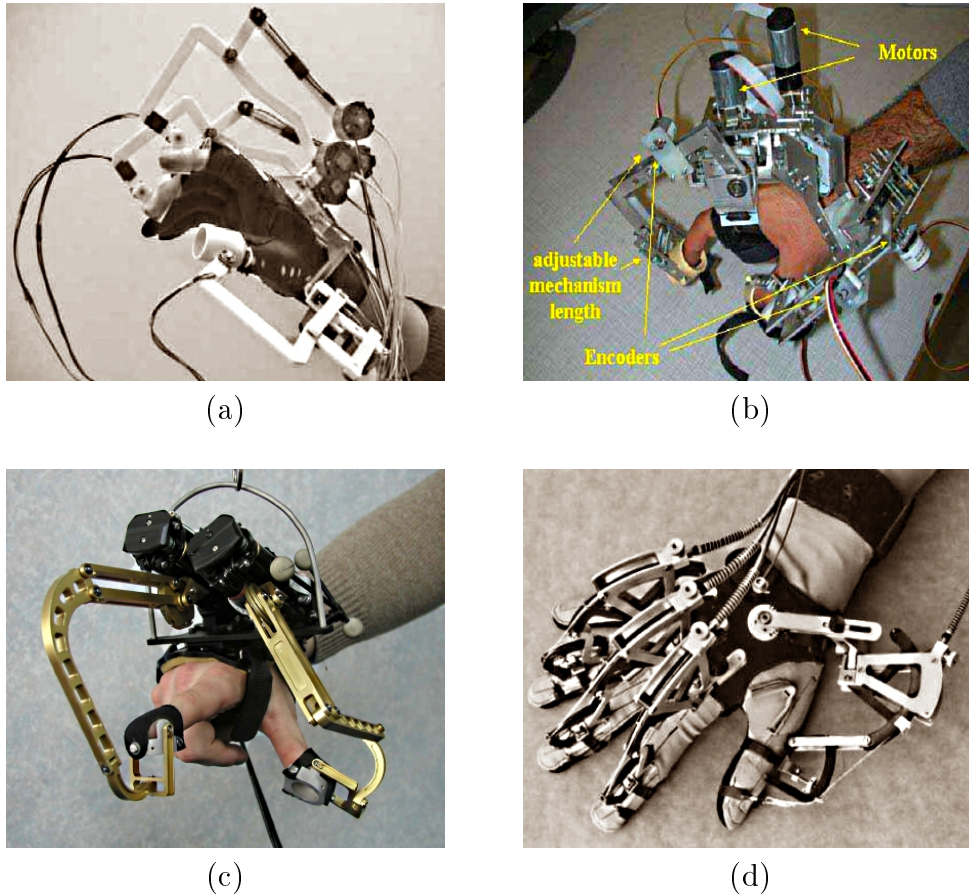


FIGURE 2.13 – Exemples de gants à retour d’effort de type exosquelette : (a) le *Master Hand*, (b) le *PANOS*, (c) le *WHIPFI* et (d) le *CyberGraspTM*.

Les interfaces haptiques présentées précédemment sont basées sur l’utilisation de freins magnétiques ou de moteurs électriques. D’autres types d’actionneurs ont été proposés, comme par exemple des actionneurs hydrauliques ou pneumatiques. Un exemple de gant à retour d’effort utilisant des actionneurs pneumatiques est le *Rutgers Master I*. Différentes versions de cette interface portable ont été réalisées depuis 1991 par l’équipe de Burdea à l’université Rutgers [29, 21]. Une structure mécanique légère (70 g) de 4 vérins est utilisée pour appliquer des efforts sur le pouce, l’index, le majeur et l’annulaire. Dans la première version, un gant de données *DataGloveTM* était utilisé pour la mesure de la flexion des doigts. Différentes expérimentations menées par Richard et al. [28, 128] ont permis de mettre en évidence certains défauts du système (frottements, etc.) et ont conduit au développement d’un nouveau prototype (*Rutgers Master II*), basés sur des actionneurs pneumatiques en plexiglas.

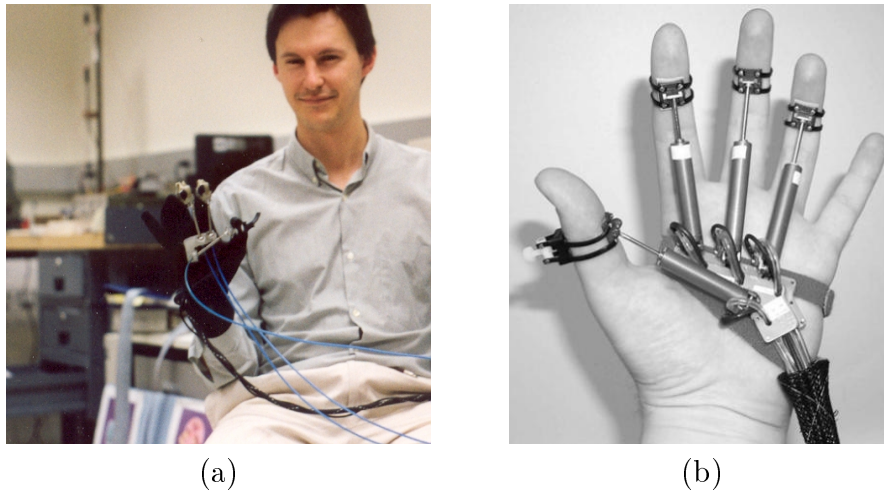


FIGURE 2.14 – Différentes versions du *Rutgers Master* : (a) le *RM I* et (b) le *RM II*.

Le gant de données *DataGloveTM* a été remplacé par des capteurs à effet hall, directement placés à la base des actionneurs. Une des limitations des actionneurs pneumatiques est leur faible bande passante (moins de 30 Hz) qui leur permet de ne simuler que des objets relativement compliants (ressorts, objets en caoutchouc, etc.) [70]. Cependant, leur ratio force/poids est un sérieux atout. Des actionneurs basés sur des technologies plus évoluées ont été proposés. Par exemple, Monkmann [106], Böse et al. [25] et Mavroïdis et al. [103] ont développé des interfaces haptiques basées sur l'utilisation de fluides électro-rhéologiques. Des interfaces utilisant des fluides magnéto-rhéologiques ont également été proposées [89].

Les exosquelettes pour le bras Des exosquelettes à retour d'effort fixés sur le(s) bras de l'utilisateur ont été développés.

Par exemple, le *Masterarm* est un exosquelette à retour d'effort passif composé d'une architecture série. Il a été conçu pour fournir une aisance maximale à l'utilisateur, et propose 3 ddl contrôlés et 3 ddl libres (redundants) pour l'épaule et le poignet. Un retour d'effort (1 ddl) est aussi appliqué au niveau du coude. Des freins électriques sont utilisés pour appliquer les efforts [85].

Les interfaces portables à câbles Basées sur les caractéristiques intéressantes offertes par les structures à câbles à réaction externe, des interfaces à câbles portables ont été proposées. Par exemple, le *WireMan* est une interface simple et légère à 3 câbles, développée pour les personnes visuellement déficientes. Cette interface, illustrée à la **figure 2.15 (a)**, est basée sur un cadre rigide placé dans le dos de l'utilisateur. Des câbles reliés à un dé à coudre dans lequel l'utilisateur place son index, permettent d'appliquer des efforts sur celui-ci. Cette interface a l'avantage de posséder des capteurs d'effort permettant de mesurer la tension de chaque câble [105]. Une interface haptique portable plus connue, développée au

Japon par Makoto Saito, est le *Haptic Gear*, illustrée sur la **figure 2.15 (b)**. Elle repose sur une structure mécanique légère, placée dans le dos de l'utilisateur et contenant quatre moteurs. Quatre câbles sont reliés à un stylet tenu par l'utilisateur et permettent d'appliquer les efforts.

L'intérêt des interfaces portables à câbles est qu'elles sont simples à mettre en oeuvre et permettent à l'utilisateur de se déplacer librement dans un espace de travail relativement important, ce qui les rend compatibles avec la plupart des dispositifs d'affichage à base de projection sur grand écran. Cependant, ces interfaces nécessitent un système de capture de mouvement externe permettant de connaître à chaque instant la position de l'utilisateur.

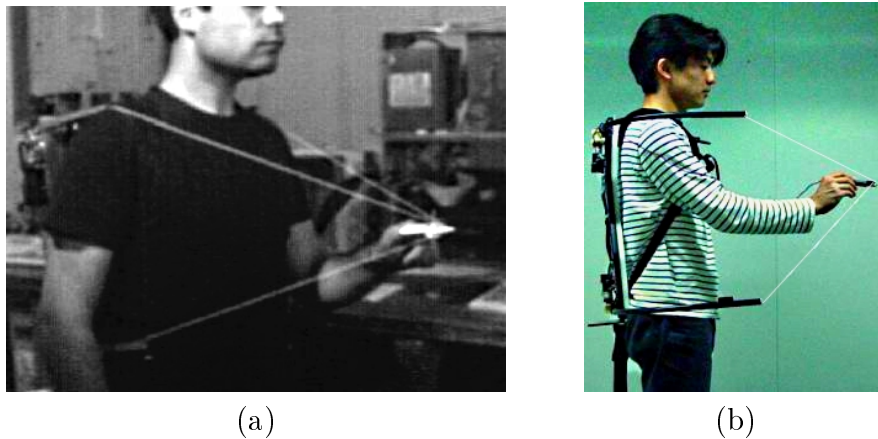


FIGURE 2.15 – Exemples d'interfaces portables à câbles : (a) le système *WireMan* à 3 câbles et (b) le système *Haptic Gear*.

2.3.3 Interfaces à retour tactile

Le retour tactile fournit des informations relatives à la forme des objets, à leur état de surface et à leur température. Il ne fournit en général aucune information relative à la complianc e ou au poids des objets (retour kinésthésique). Le retour tactile est très utile au début de l'interaction et pour la régulation des forces de préhension (sensation de glissement).

On distingue quatre approches principales pour la restitution d'informations tactiles : l'utilisation d'actionneurs (i) *pneumatiques*, (ii) *vibro-tactiles*, (iii) *électro-tactiles* et (iv) les *stimulations neuromusculaires* [140]. On trouve aussi des interfaces à *retour thermique* qui procurent à l'utilisateur des sensations de froid ou de chaud lors de contacts avec un objet virtuel ou distant.

2.3.3.1 Interfaces pneumatiques

Une des premières interfaces à retour tactile pneumatique a été réalisée au début des années 90 par Stone [147]. Cette interface (le *Teletact*) est constituée d'un gant équipé d'une vingtaine de petits ballons dont le gonflement/dégonflement est

contrôlé à l'aide d'un compresseur. L'inconvénient majeur de ce système est son manque de résolution (information haptique binaire). Cette approche a été reprise dans diverses interfaces de commandes (joystick, volant de voiture) [47]. Dans le cadre d'applications impliquant la manipulation d'objets, une interface tactile pneumatique intégrée dans le gant de données *DataGloveTM* de Zimmerman [161] a été développée. Le système est illustré sur la **figure 2.16 (a)** : des cylindres en plastique rigide, actionnés via un compresseur d'air, viennent pousser sur la pulpe des doigts de l'utilisateur.

2.3.3.2 Interfaces vibro-tactiles

Les interfaces à retour tactile à base de vibro-moteurs sont les plus répandues, sans doute parce qu'elles sont faciles à mettre en oeuvre. Des vibro-moteurs sont placés à différents endroits sur la main de l'utilisateur et peuvent être contrôlés en amplitude et/ou en fréquence. L'interface à retour vibro-tactile la plus connue est le *CyberTouchTM*. Cette interface (**Figure 2.16 (b)**), est basée sur le gant *CyberGloveTM*, commercialisé par la société Immersion [4]. Ce gant est équipé de 18 capteurs (jauge de contraintes), placés sur les principales articulations de la main. Le *CyberTouchTM* est équipé de six vibreurs, cinq placés au-dessus de chaque doigt et un dans la paume. Ce système est relativement figé, dans la mesure où les moteurs ne sont pas déplaçables. De plus, il est relativement onéreux.

Le retour vibro-tactile peut être utilisé pour améliorer les sensations rendues via un dispositif à retour d'effort, en particulier lors du contact avec une surface solide (non déformable). En effet, si les interfaces à retour d'effort permettent de bloquer les mouvements de l'utilisateur, elles ne lui procurent pas de sensation de contact. Par exemple, des travaux réalisés par Okamura [9] ont permis de construire des modèles des vibrations reçues lors du contact avec différentes surfaces. Les vibrations fournies par le modèle, en addition avec un retour de force classique, ont permis d'améliorer la sensation de contact avec une surface rigide. Le retour vibro-tactile peut aussi être utilisé pour remplacer totalement un retour d'effort. Comme nous l'avons indiqué dans le premier chapitre, des études ont montré qu'un retour tactile accompagné d'un retour auditif, permettait, sous certaines conditions, une interaction comparable en efficacité avec un retour d'effort.

Une technologie alternative utilise des bobinages audio tels ceux réalisés par *Audiological Engineering Inc.*. Patrick [120] a intégré deux bobines de ce type à son *Fingertip Tactile Display*. La flexion des doigts de la main de l'utilisateur a été mesurée via le Exos Dextrous Hand Master [99]. Une interface développée par l'entreprise EXOS (le *TouchMaster*) (**Figure 2.16 (c)**) permet de stimuler les doigts de l'utilisateur via des bobines électromagnétiques. Celles-ci procurent un retour vibro-tactile à une fréquence de 210-240 Hz avec une amplitude constante. Un retour vibro-tactile peut aussi être réalisé à l'aide d'actionneurs piézo-électriques [61, 64, 62].



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 2.16 – Illustration de différents systèmes à retour tactile : (a) interface pneumatique développée par Toshiba, (b) le *CyberTouchTM*, (c) le *TouchMasterTM* et (d) l'interface à base de matrice d'aiguilles développée par Shinohara au NIBH (Japon).

2.3.3.3 Interfaces électro-tactiles

Les systèmes à retour électro-tactile sont basés sur une stimulation directe des différents récepteurs sensoriels par le biais d'électrodes placées au contact de la peau [44]. En jouant sur les caractéristiques du courant transmis, les récepteurs sensoriels excités vont être différents, et l'on peut ainsi simuler des sensations de pression ou de vibration. Les actionneurs électro-tactiles peuvent aussi être basés sur une matrice à aiguilles vibrant à différentes fréquences [80, 73, 46]. Par exemple, Kramer [88] a développé un système qui utilise des matrices à aiguilles pour restituer des informations de contact et de géométrie de surface. Shimojo [141] a aussi utilisé une matrice à aiguilles pour la restitution d'informations d'états de surfaces. Une autre interface tactile à base d'une matrice à aiguilles a été développée au NIBH (Japon) par Shinohara (**Figure 2.16 (c)**). Johnson a utilisé des actionneurs en métal à mémoire de forme (SMM) pour son système *Programmable Tactile Simulator* [81]. La société Américaine *Xtensory Inc.* a développé un système à retour tactile appelé *Tactools* qui se compose de matrices à aiguilles (jusqu'à 3x3 par doigt) appelées *tactors* [37]. Les interfaces à base de matrices à aiguilles permettent d'obtenir une résolution fine du stimulus, autorisant un rendu tactile précis. Leur inconvénient majeur est leur encombrement. En effet, ces solutions requièrent un moteur pour chaque aiguille, et le système résultant est rarement portable, même dans le cas où les moteurs sont éloignés des aiguilles (transmission du déplacement par des câbles).

2.3.3.4 Interfaces à retour thermique

Une stimulation thermique de la peau peut être réalisée grâce à des radiations, infra-rouges ou micro-ondes, par convection (d'air ou de liquide) ou par conduction (pompes à chaleur thermo-électriques). La plupart des interfaces à retour thermique développées sont à base de cellules à effet Peltier (CEP) qui permettent un contrôle efficace de la température, aussi bien en réchauffement qu'en refroidissement. A titre d'exemple, les performances du gant haptique de l'Université Salford [48] sont de l'ordre de 20 °C/sec dans la gamme de température -5/+50 °C. Ce type de dispositif à l'avantage d'être peu coûteux et peu encombrant mais peut provoquer des brûlures graves. En effet, les cellules disponibles dans le commerce peuvent afficher une différence de température entre les 2 faces de 70 °C.

2.4 Configurations visuo-haptiques

Un des objectifs de notre travail est de proposer une configuration visuo-haptique permettant d'interagir avec des maquettes ou prototypes virtuels à échelle 1 : 1. Celle-ci doit intégrer de manière efficiente une interface haptique (kinesthésique et tactile) et un dispositif d'affichage immersif. Les paragraphes précédents ont permis d'analyser les dispositifs d'affichage et les interfaces haptiques existants. Dans cette section, nous décrivons les différentes configurations

visuo-haptiques qui ont été développées dans le cadre d'applications de réalité virtuelle, afin d'identifier les plus adaptées à notre problématique. Ces configurations sont classées en fonction du type de dispositif d'affichage et de l'interface haptique utilisés.

2.4.1 Configurations de bureau

Les configurations de bureau utilisent des interfaces haptiques à structure mécanique série, parallèle, ou portable. Celles-ci sont décrites dans les paragraphes suivants.

2.4.1.1 Utilisation d'interfaces à structure série

Les premières configurations visuo-haptiques développées étaient basées sur l'utilisation du *PHANToMTM* [2]. La **figure 2.17(a)**, illustre une configuration utilisant le *PHANToMTM* 6.0. Des interfaces haptiques à structure série, développées au CEA, ont été utilisées dans des configurations de bureau pour des applications de téléopération [53]. La **figure 2.17(b)**, montre une configuration utilisant le premier prototype du *VirtuoseTM* 6.0. En 2003, Lécuyer et al. [95] ont proposé un système, appelé *HOMERE*, combinant un accessoire (prop) et une interface à retour d'effort (**Figure 2.17(c)**). Ils ont attaché une canne à l'extrémité du *VirtuoseTM* pour entraîner les aveugles à l'utilisation de leur canne. Une configuration de bureau relativement intrusive, le *PHI* (Pneumatic Haptic Interface), développée à l'université de Dallas aux Etats-Unis est illustrée sur la **figure 2.17(d)**. Cette interface haptique, de type exosquelette, utilise des actionneurs pneumatiques [74].

2.4.1.2 Utilisation d'interfaces à structure parallèle

Différentes interfaces haptiques à structure mécanique parallèle, telles que le *DeltaTM*, le *Virtuose DesktopTM* [3], ou plus récemment le *FalconTM* [108], sont utilisées dans des applications basées sur des configurations de bureau. D'autres configurations utilisant des interfaces à câbles ont également été développées au Tokyo Institute of Technology (**Figure 2.18(a)**) dans l'équipe du Professeur Sato et à l'INRIA Rhône-Alpes dans l'équipe de S. Coquillart (**Figure 2.18(b)**).

2.4.1.3 Utilisation d'interfaces portables

Plusieurs types d'interfaces haptiques portables (à réaction interne) ont été utilisés dans des configurations de bureau. La **figure 2.19(a)** montre la configuration visuo-haptique *FishTank* développée au CSIRO [154]. Le *CyberGraspTM* a été inséré derrière le plan d'affichage du système, permettant la co-localisation des espaces de visualisation et d'interaction. Un autre gant à retour d'effort (*LRP Dextrous Hand Master*) de type exosquelette (**Figure 2.19(b)**) a été développé

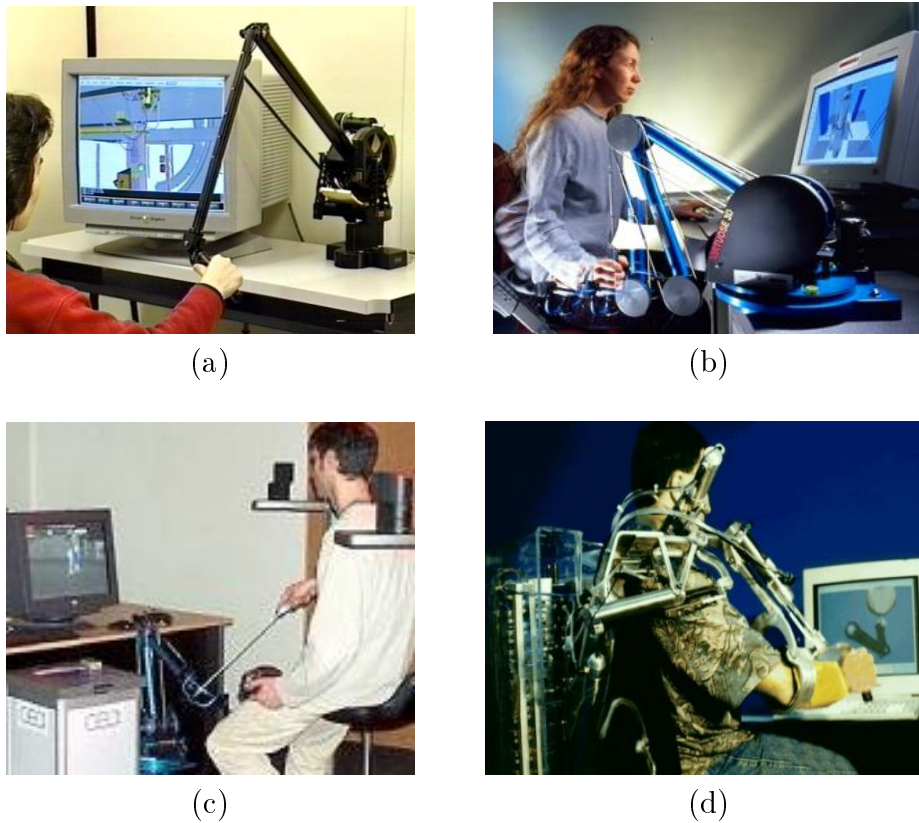


FIGURE 2.17 – Exemples de configurations visuo-haptiques basées sur l'utilisation de moniteurs et d'interfaces séries : (a) le *PHANTOMTM 6.0*, (b) le premier prototype du *VirtuoseTM*, (c) le système *HOMERE* et (d) l'interface *PHI* développée à l'université de Dallas.

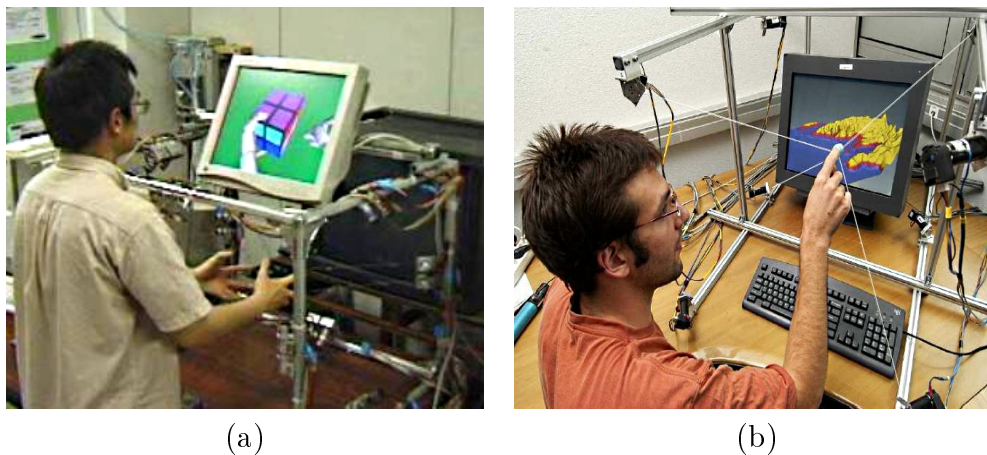


FIGURE 2.18 – Configurations visuo-haptiques de bureau utilisant des interfaces à câbles : (a) le *SPIDAR 4+4* et (b) le *SPIDAR I*.

par Bouzit [20] au Laboratoire de Robotique de Paris, et utilisé pour la manipulation d'objets virtuels [135, 133, 130] et la téléopération de robots. Une interface haptique (*Virtual Grabber*) portable relativement innovante, illustrée sur la **figure 2.19(c)**, a été développée par Interface Technology Research (UK). Cette interface intègre un capteur de mouvement électromagnétique et un actionneur pneumatique passif. Celle-ci a été utilisée pour la manipulation d'objets virtuels [130]. Enfin, les différentes versions du gant à retour d'effort *Rutgers Master* (**Figure 2.19(d)**) ont été utilisées dans une configuration de bureau [129, 21].



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 2.19 – Configurations visuo-haptiques de bureau utilisant un gant à retour d'effort : (a) le *FishTank* du CSIRO [138], (b) le système *LRP Dextrous Hand Master*, (c) le *Virtual Grabber* et le (d) *Rutgers Master*.

2.4.2 Configurations à base de plan de travail

Les configurations visuo-haptiques à base de plans de travail utilisent également des interfaces haptiques à structure mécanique série, parallèle, ou portable.

2.4.2.1 Utilisation d'interfaces à structure série

L'intégration d'interfaces haptiques à structure mécanique série sur des plans de travail pose des problèmes de compatibilité, relatifs en particulier à l'occultation du champ visuel. Une des rares configurations, le *Visual Haptic Workbench*, a été proposée en 2000 par Brederson et al. [24], à l'université de l'Utah aux Etats-Unis. Celle-ci est illustrée à la **figure 2.20**. Une approche similaire avait auparavant été proposée par Grant et al. [56]. Dans les deux cas, le dispositif haptique utilisé est un *PHANTOMTM* fixé à une potence placée au-dessus du plan de travail.

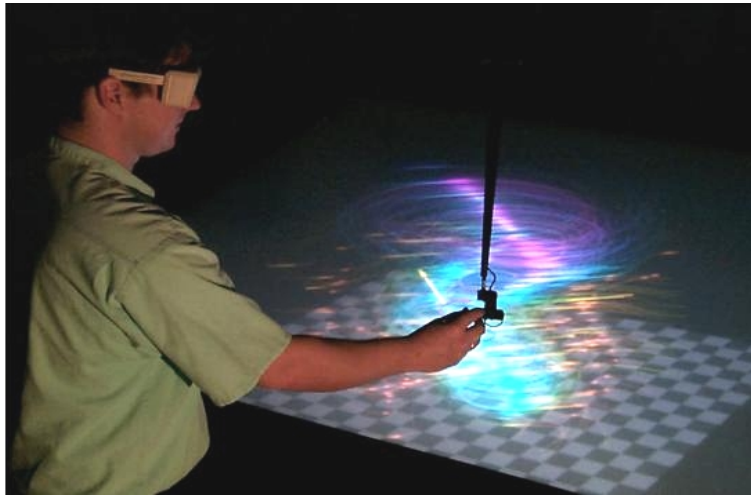
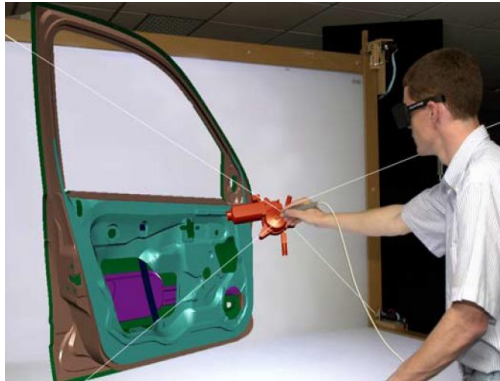


FIGURE 2.20 – Le *Visual Haptic Workbench* de l'université de l'Utah.

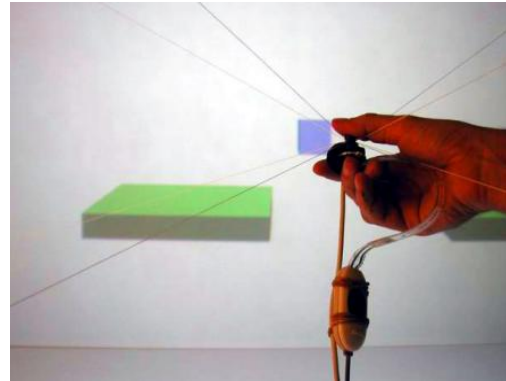
2.4.2.2 Utilisation d'interfaces à structure parallèle

Afin de palier le problème d'occlusion du champ visuel, l'intégration d'une interface haptique à câbles à 3ddl (**Figure 2.21 (a)**) sur un plan de travail (*Stringed Haptic Workbench*), a été réalisée à l'INRIA par Tarrin et al. [149]. Par la suite, Paljic [118] a proposé une version passive de ce système (**figure 2.21 (b)**). Les moteurs du *SPIDAR* ont ainsi été remplacés par des freins magnétiques. Ces configurations visuo-haptiques sont basées sur un plan de travail à deux écrans : vertical et horizontal. Un système de capture de mouvement électromagnétique permet de mesurer en temps réel les mouvements de la tête.

Plus récemment, Ortega et al. [109, 110, 111] ont proposé l'intégration d'un accessoire (**Figure 2.22(a)**) au *Stringed Haptic Workbench*, lui ajoutant ainsi 3 ddl (orientation). Ainsi, l'utilisateur voit l'outil réel et sa représentation virtuelle. Il peut alors positionner et orienter un pistolet afin de réaliser virtuellement un collage sur un véhicule (**Figure 2.22 (b)**). Ce système a été développé dans le cadre d'une collaboration impliquant l'INRIA et PSA Peugeot Citroën (**Figure**

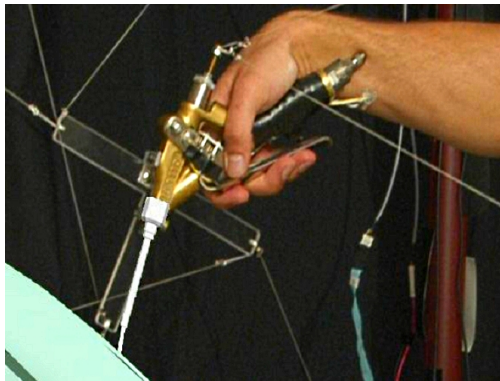


(a)

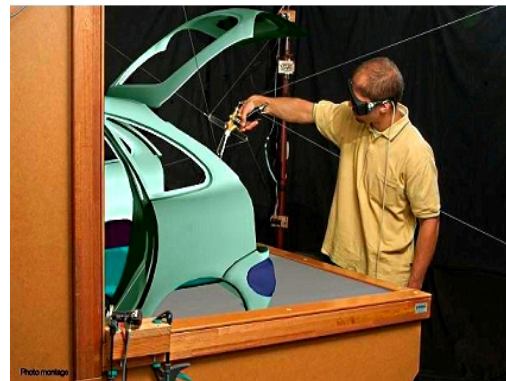


(b)

FIGURE 2.21 – Configurations visuo-haptiques utilisant une interface à câbles sur un plan de travail : (a) le *Stringed Haptic Workbench* et (b) la configuration passive proposée par Paljic [118].



(a)



(b)

FIGURE 2.22 – *Stringed Haptic Workbench* à 6 degrés de liberté : (a) pistolet de collage attaché au dispositif à câbles, (b) simulation d'une pose de joint sur le coffre d'un véhicule.

2.23). Afin d'adapter l'espace de travail de l'interface à câbles à celle du plan de travail, une structure métallique plus étendue a été utilisée (*INCA 6DTM*). L'intérêt de ce type de configuration est multiple. Il permet d'interfacer directement l'utilisateur avec l'environnement virtuel (aucun outil ne vient s'intercaler). De plus, une co-localisation des espaces de visualisation et de manipulation est possible. On remarque toutefois que l'espace de travail du système n'est pas très étendu et ne permet donc d'interagir qu'avec des prototypes virtuels de taille moyenne. En outre, l'espace de manipulation est limité à celui du plan de travail (hauteur minimale d'environ 1 mètre).

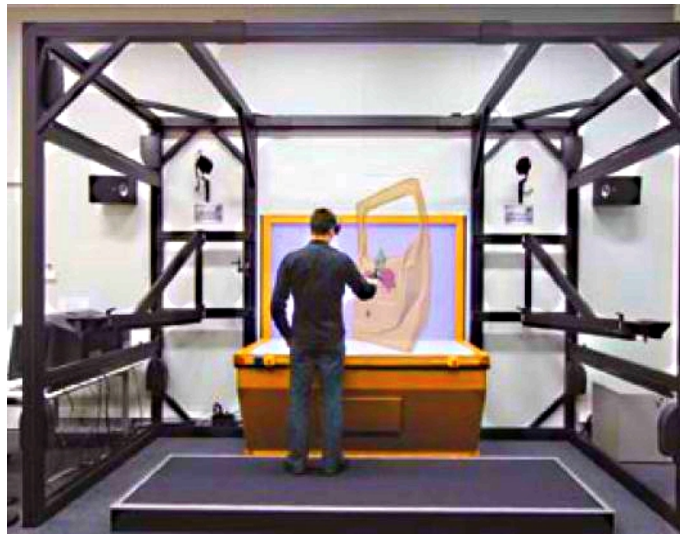


FIGURE 2.23 – Configuration visuo-haptique basée sur un plan de travail et l'interface haptique *INCA 6DTM*.

2.4.2.3 Utilisation d'interfaces portables

Pour palier les contraintes liées à l'utilisation de câbles, Lécuyer et al. [94] ont proposé d'utiliser une interface haptique portable développée par le CEA. Cette interface, appelée le *Wearable Haptic Handle (W²H)*, fournit des stimulations haptiques à l'intérieur de la main de l'utilisateur. L'originalité est que la partie supérieure est une petite plate-forme de Stewart [146] qui bouge selon six degrés de liberté par rapport à la base (**Figure 2.24**). L'espace de travail de la partie supérieure correspond à un cylindre de 20 mm de hauteur et d'un rayon de 8 mm. Le poids total de la poignée est de 250 g. Le choix d'un tel dispositif s'explique dans le fait que la poignée *W²H* a un espace de travail plus large qu'un périphérique haptique traditionnel et que cet espace de travail correspond mieux à l'espace de visualisation. En outre, cette poignée est suffisamment petite pour ne pas cacher le champ de vision de l'utilisateur.



FIGURE 2.24 – Configuration visuo-haptique basée sur un plan de travail et la poignée *W2H*.

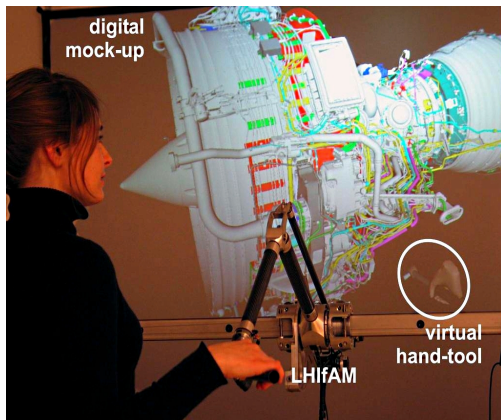
2.4.3 Configurations à base de mur immersif

Les configurations visuo-haptiques à base de mur immersif utilisent des interfaces haptiques à structure mécanique série, parallèle, et portable.

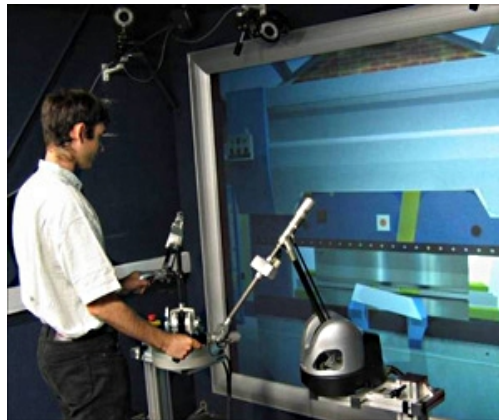
2.4.3.1 Utilisation d'interfaces à structure série

Dans la majorité des cas, les configurations visuo-haptiques basées sur un mur immersif utilisent des interfaces haptiques à structure mécanique série. Ceci s'explique par le fait que ce type de structure est très utilisé dans le domaine de la téléopération et repose donc sur un savoir-faire historique des principaux acteurs de l'haptique. Ainsi, en 2004, Borro et al. [16] ont proposé une plate-forme destinée à la maintenance aéronautique. Cette plate-forme, illustrée sur la **figure 2.25(a)** repose sur l'utilisation d'une interface haptique appelée *LHifAM* (*Large Haptic Interface for Aeronautics Maintainability*). Comme le montre la figure, l'interface haptique est fixée sur deux rails qui permettent d'étendre son espace de travail selon un plan parallèle à l'écran. Cette interface propose un retour d'effort sur 6 ddl. Comme la plupart des interfaces similaires, elle n'offre pas à l'utilisateur la possibilité de manipuler des objets avec une grande dextérité.

En 2004, le laboratoire LIST du CEA a proposé une configuration visuo-haptique destinée principalement à la maintenance automobile. Cette plate-forme, illustrée sur la **figure 2.25(b)**, est composée d'un système de capture de mouvement à base de caméras infrarouges, de deux *VirtuoseTM* à 6 ddl, et d'un dispositif d'affichage stéréoscopique actif. En 2005, Drieux et al. [40] ont proposé en collaboration avec EADS, une configuration visuo-haptique baptisée *SAMIRA* (**Figure 2.25(c)**), utilisant également le *VirtuoseTM*. Contrairement à la plate-forme *LHifAM*, ce système ne permet pas une translation de l'interface haptique utilisée. Un écran de 4 m × 2.5 m avec un affichage stéréoscopique est utilisé.



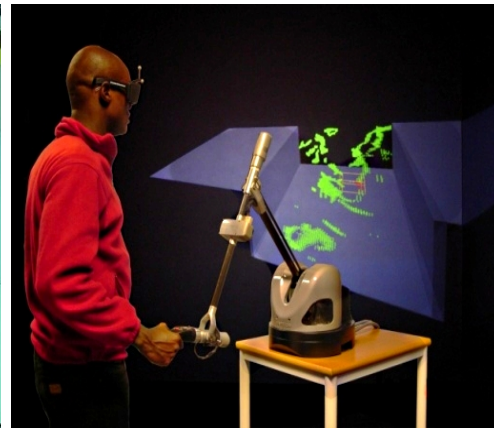
(a) Projet LHIFAM



(b) Plate-forme développée au CEA



(c) Projet Samira



(d) Projet CoRSAIRe

FIGURE 2.25 – Configurations visuo-haptiques basées sur l'utilisation d'un mur immersif et d'une interface haptique série : (a) le système *LHIFAM*, (b) plate-forme développée au CEA LIST, (c) plate-forme du projet *SAMIRA*, et (d) plate-forme du projet *CoRSAIRe*.

Plus récemment, une configuration utilisant également le *VirtuoseTM* a été développée (**Figure 2.25(d)**), dans le cadre du projet *CoRSAIRe* [96].

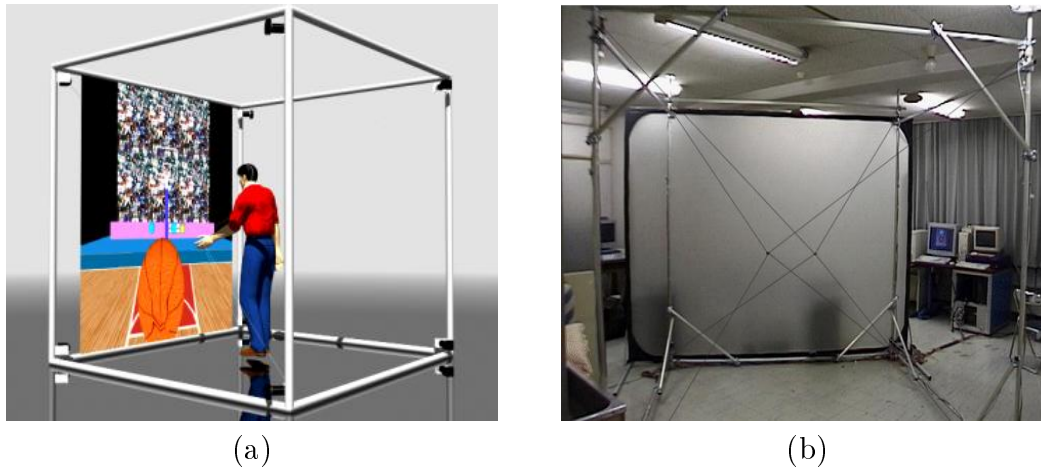


FIGURE 2.26 – Configuration visuo-haptique utilisant le *Scalable SPIDAR* intégré à un mur immersif.

2.4.3.2 Utilisation d'interfaces à structure parallèle

En 2000, au Tokyo Institute of Technology, la version étendue du *SPIDAR* a été intégrée à mur immersif par Bouguila et al. [18]. Cette configuration visuo-haptique, illustrée sur les **figures 2.26 (a) et (b)**, offre plusieurs avantages par rapport aux configurations présentées dans la section précédente. Elle est bimanuelle : l'utilisateur a la possibilité de prendre et de déplacer les objets avec ses deux mains. De plus, l'espace de travail est, a priori, plus important, permettant d'interagir avec des prototypes virtuels de grande taille à échelle 1:1. Enfin, cette configuration n'est pas intrusive (notion de transparence) dans le sens où l'utilisateur est directement interfacé avec l'environnement virtuel. Cette caractéristique, déjà évoquée précédemment, est propre aux interfaces à câbles.

2.4.3.3 Utilisation d'interfaces portables

Peu d'interfaces haptiques portables ont été intégrées à des configurations à base de mur immersif. Ceci est dû au fait qu'il existe relativement peu d'interfaces portables et que celles-ci ont un poids non négligeable et non compensé. Une configuration a été proposée par Gosselin dans le cadre du projet européen *MU-VII* [54] (**Figure 2.27 (a)**). Cette configuration utilise le gant *WHIPFI* (**Figure 2.13 (c)**). Un câble est utilisé afin que l'utilisateur ne supporte pas seul le poids du système. Le gant à retour d'effort *PANOS* a été utilisé pour interagir avec des objets virtuels devant un mur immersif (**Figure 2.13 (b)**). La configuration visuo-haptique utilisant ce gant est illustrée sur la **figure 2.27 (b)**.

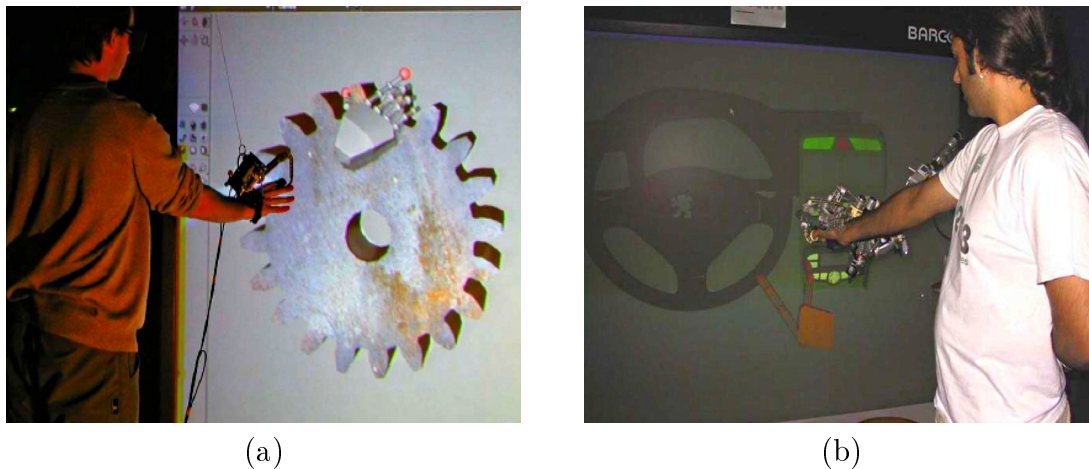


FIGURE 2.27 – Configurations visuo-haptiques utilisant un mur immersif et une interface haptique portable : (a) le *WHIPFI* et (b) le *PANOS*.

2.4.4 Configuration à base de salle immersive

Les configurations visuo-haptiques à base de salle immersive utilisent principalement des interfaces haptiques à structure mécanique série. Les salles immersives sont en effet principalement dédiées à la visualisation de prototypes virtuels dans le cadre de revues de projet, dans lesquelles l'interaction haptique n'est pas primordiale. Un *VirtuoseTM* 6D a toutefois été utilisé à l'INRIA de Rennes pour interagir de manière collaborative avec le prototype virtuel d'une Renault Scénic (Figure 2.28).



FIGURE 2.28 – Exemple de configuration visuo-haptique utilisant une salle immersive et l'interface série *VirtuoseTM*.

2.4.5 Configurations à base de visiocube

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, ce type de dispositif d'affichage permet une immersion visuelle et un espace de travail étendus dans lequel l'utilisateur évolue relativement librement. Le choix et l'intégration d'une interface haptique n'est donc pas simple. Des tentatives d'intégration ont toutefois été proposées. Les premières ont été basées sur l'utilisation d'interfaces haptiques à structure mécanique série (*PHANToMTM* ou *VirtuoseTM*).

2.4.5.1 Utilisation d'interfaces à structure série

La **figure 2.29 (a)**, illustre une configuration visuo-haptique basée sur un visiocube et un *VirtuoseTM*. Ce dernier a été placé légèrement à droite en dehors du visiocube afin de ne pas abimer l'écran du bas (sol). Une autre solution permettant d'augmenter l'espace de travail de l'interface utilisée, un *PHANToMTM*, a été proposé par Barbagli et al. [11]. Un robot mobile sur lequel est placée l'interface (**figure 2.29 (b)**), a été utilisé.



(a)



(b)

FIGURE 2.29 – Configurations visuo-haptiques proposées pour un visiocube : (a) intégration d'un *VirtuoseTM* dans un SAS CubeTM et (b) intégration d'un *PHANToMTM* sur un robot mobile.

2.4.5.2 Utilisation d'interfaces à structure parallèle

Plus récemment, une approche utilisant un *INCA 6D* dans le SAS CubeTM [5] a été développée par l'entreprise française Haption [3] (**Figure 2.30 (a)**). Ce système dispose de 8 moteurs, proches des sommets du visiocube. Dans une configuration à 4 câbles, l'utilisateur peut travailler en utilisant les deux mains. L'application permet de simuler une opération de changement de roue sur une voiture de course. La solution est relativement efficace, cependant comme nous l'avons indiqué au début du chapitre, l'utilisateur est isolé du monde réel (perte de repères, effets secondaires, etc.). De plus, le système implique obligatoirement

un affichage stéréoscopique des images. Une autre configuration proposée par Saito est basée sur l'interface portable à câbles *Haptic Gear* [68] (**Figure 2.30 (b)**). L'utilisateur, portant l'*Haptic Gear*, se déplace à l'intérieur du visiocube et applique une force sur la portière d'une automobile. Contrairement à la configuration précédente, il peut s'orienter dans n'importe quelle direction, utilisant ainsi pleinement les possibilités d'interaction offertes par le visiocube. Cette configuration nécessite l'utilisation d'un système de capture de mouvement externe. Le système électromagnétique grand champ *PolhemusTM* a été utilisé dans ce cas.



(a)



(b)

FIGURE 2.30 – Configurations visuo-haptiques basées sur un visiocube et une interface haptique à câbles : (a) utilisation de l'*INCA 6D* dans le *SASCubeTM* et (b) intégration de l'*Haptic Gear* dans un *CaveTM*.



(a)



(b)

FIGURE 2.31 – Configurations visuo-haptiques basées sur un visio-casque : (a) un système *CyberForceTM* et (b) l'application *Virtual Chambara*.

2.4.6 Configurations à base de visio-casque

L'intégration d'une interface haptique dans une configuration basée sur un visio-casque est délicate. Comme nous l'avons dit au début du chapitre, l'avantage principal des visio-casques est que les espaces de visualisation et de manipulation sont totalement superposés. Cependant, l'opérateur n'a ni la vision de ses mains ni celle de l'interface haptique qu'il utilise. Les **figure 2.31 (a)** et **figure 2.31 (b)** illustrent deux configurations différentes. La première utilise le *CybergGraspTM* relié à une structure mécanique série permettant d'appliquer des efforts sur celui-ci selon 3 ddl. Un système complet intégrant deux *CybergGraspTM*, pour une interaction bimanuelle, le *CyberForceTM* a été acquis par PSA Peugeot Citroën. La seconde configuration, plus ludique, a été développée par des étudiants japonais dans le cadre de leur projet de fin d'étude. Le système, appelé *Virtual Chambara* permet de simuler un combat de samouraïs. L'interface haptique est relativement spécifique et permet de simuler des impulsions d'effort sur la main du combattant. Ces impulsions sont obtenues en bloquant très rapidement une toupie tournant à vitesse constante, placée sur l'accessoire (sabre) tenu par l'utilisateur.

2.5 Conclusion

Ce chapitre constitue un état de l'art des dispositifs d'affichage et des interfaces haptiques (kinesthésiques et tactiles) utilisés en réalité virtuelle, et des différentes configurations visuo-haptiques existantes. Une classification des interfaces kinesthésiques mettant en avant le type d'architecture mécanique utilisée (série ou parallèle) et le référentiel par rapport auquel sont appliqués les efforts (interfaces à réaction interne ou externe) a été proposée. Nous avons ensuite décrit les différentes approches technologiques développées pour le retour tactile. Notre analyse a permis d'identifier les avantages et les contraintes des configurations visuo-haptiques développées, et d'identifier les plus pertinentes pour notre problématique : les configurations immersives à bases de câbles.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une méthodologie permettant l'intégration (simplification et optimisation) et l'interaction haptique avec des prototypes virtuels.

Chapitre 3

Simplification, physicalisation et rendu haptique

3.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons analysé les apports et les contraintes liés au prototypage virtuel. Nous avons vu que les prototypes virtuels offrent de nombreux avantages par rapport aux prototypes physiques. Cependant leur intégration dans une application en environnement virtuel (EV) passe impérativement par une phase de simplification et d'optimisation.

En outre, l'utilisation efficace d'un prototype virtuel exige que celui-ci soit doté de caractéristiques physiques pouvant être restituées à l'utilisateur via une interface haptique. Dans ce contexte, l'intégration de l'utilisateur dans l'EV est impérative. Celle-ci repose en particulier sur l'animation temps-réel d'un avatar physicalisé, basé sur un modèle biomécanique. Ce chapitre est consacré à la simplification, la physicalisation et le rendu haptique de maquettes numériques et à l'intégration de opérateur humain.

3.2 Maquettes numériques et virtuelles

La **modélisation 3D** consiste à créer un objet 3D, grâce à un logiciel de modélisation, par ajout, soustraction et modification de ses constituants. Différents types de modélisation existent. Dans la plupart des cas, les modèles utilisés en réalité virtuelle sont des *modèles polygonaux*. En effet, les cartes graphiques sont optimisées pour traiter et afficher des polygones (généralement des triangles). Un *modèle polygonal* est décrit par une liste de sommets et d'arêtes. La *modélisation polygonale* utilise des outils tels que l'extrusion, la coupe (cut, split), la soudure/rétractation (weld/collapse), qui induisent une marge d'erreur souvent invisible à l'oeil nu. Cependant, sans effet de lissage, l'objet apparaît anguleux si le nombre de polygones qui le constitue est faible.

Les maquettes numériques utilisées dans l'industrie nécessitent un niveau de précision important, notamment lorsque les modèles 3D servent de référence pour

les machines outils. Un exemple de maquette numérique (boîtier de phare) développée par Valeo Lighting Systems (Angers), est illustré sur la **figure 3.1**. Les maquettes numériques sont constituées d'éléments définis par des équations mathématiques ou des formes polynomiales. Elles sont généralement modélisées par des *NURBS* (Non Uniform Rational Basic Spline) qui sont des réseaux de courbes intégrant des points de contrôles (control vertices). L'interpolation des courbes entre ces points peut se faire automatiquement selon un algorithme spécifique, par la manipulation de tangentes de courbes de Bézier, ou encore par la modification des paramètres d'interpolation.

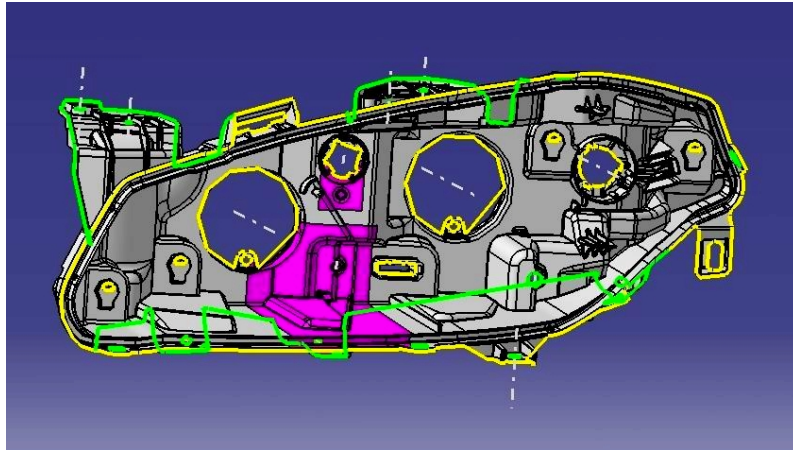


FIGURE 3.1 – Exemple de maquette numérique (CAO).

En fonction du logiciel utilisé, les maquettes numériques peuvent être de divers formats mais possèdent un certain nombre d'éléments en commun que l'on peut classer en quatre groupes. Le premier regroupe les éléments qui n'interviennent pas directement dans la géométrie du modèle comme les *repères*, *plans de coupe*, *annotations textuelles*, etc.. Le deuxième regroupe les éléments contribuant à la définition des premières représentations du produit en 3D *représentation fils de fer*. Le troisième groupe regroupe les *éléments surfaciques de la maquette*. Enfin, le dernier groupe concerne ses *éléments volumiques*.

Notre objectif est de générer à partir de maquettes numériques issues de logiciels de CAO (Catia, SolidWorks, etc.) des maquettes utilisables dans des applications 3D temps réel, c'est à dire (i) possédant une bonne résolution (nombre de polygones important) et (ii) pouvant être traitées par des moteurs physiques (calcul des collisions, comportement dynamique) tout en respectant un niveau de cohérence maximum entre leurs modèles graphiques et leurs modèles physiques.

Dans les paragraphes suivants, nous proposons une méthodologie intégrant différentes étapes permettant de transformer les maquettes numériques complexes en maquettes virtuelles. La méthodologie et le format de conversion proposés permettent de minimiser la perte des données lors de la conversion. En outre, notre approche permet la physicalisation des maquettes virtuelles a posteriori, ce qui rend encore plus importante l'étape de conversion et d'optimisation.

3.3 Traitement des maquettes numériques

Le processus de traitement des maquettes numériques est constitué en général de quatre phases successives, illustrées sur la **figure 3.2** : (1) la *phase de triangulation* qui consiste à transformer la maquette numérique en maquette virtuelle, (2) la *phase de mise en cohérence*, qui consiste à corriger les imperfections (trous) engendrées par la phase précédente (polygones non tangents) et mal gérées par les moteurs de rendu et les moteurs physiques, (3) la *phase de suppression des polygones non visibles*, et (4) la *phase de décimation* qui permet de diminuer le nombre de polygones et ainsi optimiser la maquette virtuelle. Ces étapes ont été présentées en 2002, 2003 et 2005 par Paillot et al.[115, 117, 114, 116]. S'ajoute à celles-ci une possible étape de physicalisation qui donne des propriétés physiques aux prototypes virtuels. Cette dernière nous paraissait indispensable dans notre étude.

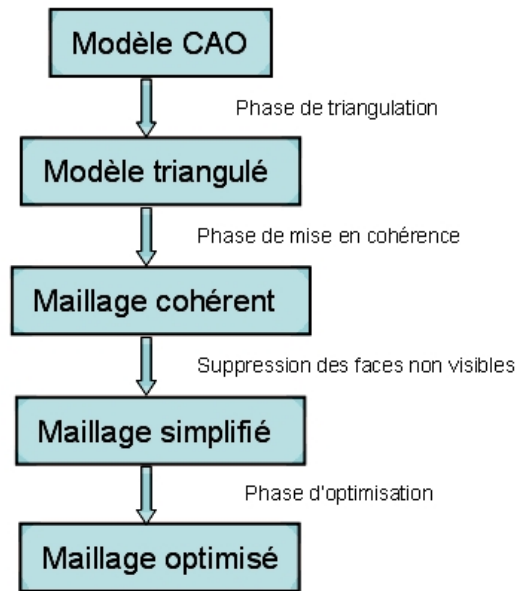


FIGURE 3.2 – Phases successives de transformation de la maquette numérique en maquette virtuelle avec maillage optimisé.

Différents logiciels permettent d'effectuer certaines étapes du traitement d'une maquette numérique. Cependant, la plupart d'entre-eux ne permettent pas d'effectuer l'ensemble des étapes de ce processus sous une même plate-forme. Par exemple, Paillot et al.[115] ont présenté, en 2002, des travaux concernant la visualisation en temps-réel de modèles issus de la CAO dans une salle immersive. Les travaux se basent sur l'utilisation d'un modèleur CAO pour la préparation des données, puis d'un logiciel nommé *SimpolyTM* pour la phase de simplification des modèles. Ce logiciel permet de piloter, de manière automatique, différents critères de réduction du nombre de polygones. Cette réduction se fait de manière non uniforme [150, 152]. Un algorithme de suppression des faces cachées a été implémenté par la suite. Cet algorithme n'était pas assez robuste. Il a donc été amélioré puis testé dans différentes simulations par Paillot[114]. Les résultats ont montré l'efficacité réelle de la suppression des faces non visibles. Cette étape n'était pas nécessaire dans notre cas.

En ce qui nous concernait, nous voulions rester dans un environnement familier, d'où l'utilisation d'un modèleur CAO (Catia, SolidWorks, etc.) et d'un modèleur RV (3DS Max, Maya, etc.) dont les interfaces se confondent de plus en plus. On se demandait ici s'il n'était pas possible de rester dans un environnement de type conception avec des logiciels de modélisation qui possèdent leurs propres algorithmes. Valeo Lighting Systems, comme la plupart des entreprises du secteur automobile, utilise le logiciel Catia V5 qui permet d'exporter des maquettes numériques sous différents formats tel que *.STL*, *.IGES*, *.WRL*, etc. La majorité des logiciels de modélisation utilisés pour le développement d'applications 3D temps réel (3DS Max, Maya, etc.) permettent d'importer des modèles au format *.STL*. Celui-ci a été initialement conçu pour la stéréolithographie (prototypage rapide), ce qui en fait un format d'échange intéressant.

3.4 Méthodologie proposée

Dans cette partie, nous décrivons la méthodologie que nous avons mise en place. Celle-ci est basée sur les quatre étapes décrites précédemment, et traite donc, dans un premier temps, de l'export des données CAO (de Catia V5 R17) et de leur import dans le logiciel 3DS Max 8.0. Les étapes suivantes impliquent trois phases successives d'optimisation des maquettes virtuelles, en vue de leur intégration (chargement et physicalisation) dans une application 3D temps-réel. Cette méthodologie a été validée en terme de temps de conversion et de physicalisation des données, de taille des maquettes virtuelles, et de rendus graphique et haptique.

3.4.1 Export des maquettes numériques

La conversion des maquettes numériques (export à partir de Catia V5) en maquettes virtuelles, constitue la première étape du processus de traitement des données. Lors de cette étape, le modèle subit une phase de triangulation [38].

Cette phase, consistant à discrétiser les surfaces des maquettes numériques, est basée sur une *modélisation par subdivision de surface*, gérée par de nombreux logiciels (3DS Max, Maya, Lightwave, Softimage, etc.). La *modélisation par subdivision de surface* se rapproche de la *modélisation polygonale* par les techniques utilisées lors de la création de modèles 3D. Elle consiste à accélérer le processus de modélisation, grâce à la subdivision automatique d'une partie de la surface du modèle, afin d'ajouter des détails à certains endroits uniquement, sans se soucier du nombre total de facettes composant l'objet. Les travaux de Paillot et al.[115, 114] montrent l'importance de la maîtrise de différents paramètres utilisés lors du processus de conversion des maquettes numériques. La **figure 3.3** illustre les trois paramètres principaux :

- l'erreur de courbure (*SAG*) : écart entre la courbe de référence et les arêtes générées lors de la triangulation,
- la longueur d'une arête (*STEP*) : taille maximale des arêtes générées,
- l'angle (α) entre deux faces partageant une même arête.

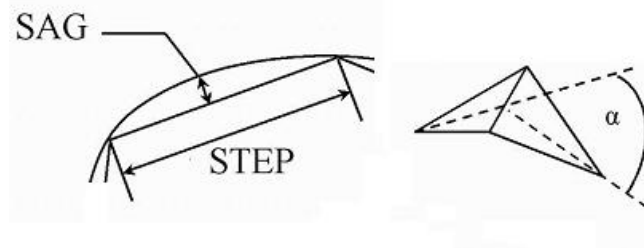


FIGURE 3.3 – Illustration des principaux paramètres de triangulation et d'optimisation des données (*SAG*, *STEP*, et α [115, 114]).

La résolution (nombre de polygones) des maquettes virtuelles est directement liée aux valeurs des paramètres d'exportation (*SAG*, *STEP* et α). Plus la valeur de ces paramètres est faible, plus la taille (nombre de polygones) de la maquette virtuelle générée est grande et plus celle-ci est topologiquement cohérente avec la maquette numérique. Cependant, un nombre trop élevé de polygones engendre une réduction de la fréquence de rafraîchissement des images. Bien que les stations de travail actuelles permettent d'afficher plusieurs millions de polygones, il est impératif d'optimiser la taille des maquettes virtuelles dès lors que l'on vise une interaction en temps-réel.

La **figure 3.4** illustre la phase de triangulation des maquettes numériques. Lors de l'export des maquettes numériques, on affecte une valeur d'erreur de courbure (*SAG*). Les paramètres *STEP* et α s'adaptent à cette valeur. La valeur choisie pour l'erreur de courbure est primordiale puisqu'elle conditionne le processus de transformation global. En affectant une valeur suffisamment faible (par exemple inférieure à 0.1 mm) à ce paramètre, l'œil humain n'est plus capable de distinguer les arêtes des polygones. Afin de tester les limites de notre approche, nous avons choisi d'affecter à ce paramètre la valeur de 0.01 mm.

3.4.2 Import de maquettes virtuelles

Lors de l'import des données dans le logiciel 3D Studio Max 8.0, les paramètres α , *STEP* et *SAG* de la maquette virtuelle peuvent encore être modifiés. En effet, le logiciel 3D Studio Max 8.0, réinterprète le maillage de la maquette importée afin de permettre une meilleure gestion des éventuelles modifications. Dans une démarche industrielle, ce processus d'importation n'est pas un facteur limitant. Ainsi, différentes combinaisons d'export/import peuvent être testées.

Les maquettes virtuelles sont constituées d'un ensemble de points (maillage) qui forme une l'enveloppe convexe. Ce maillage peut contenir des incohérences comme par exemple des trous. Ces trous sont dûs à une mauvaise orientation des normales de certains polygones (facettes). Ainsi, un trou peut apparaître selon un angle de vue particulier (face extérieure), et pas dans un autre (face intérieure). Pour palier ce phénomène, les étapes suivantes ont été proposées :

- la maquette virtuelle est importée une seconde fois,
- une inversion des normales est effectuée,
- les deux maquettes sont unifiées.

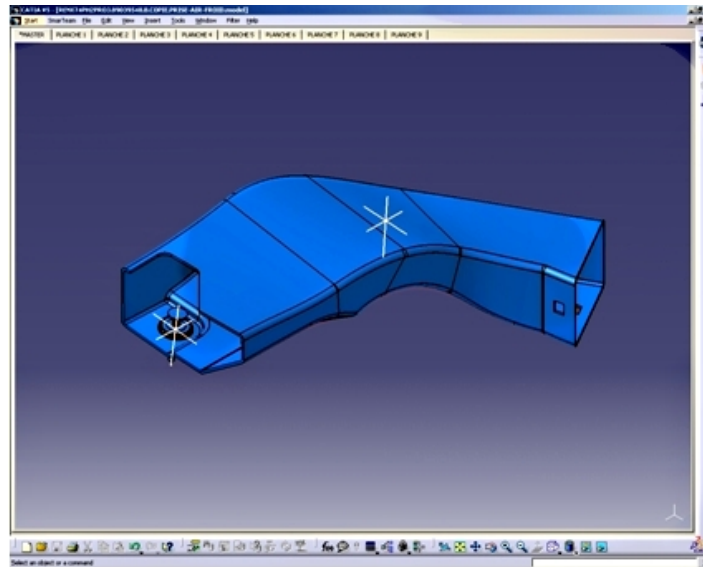
Un aspect important de ce processus est que 3DS Studio Max 8.0 permet d'unifier les deux maquettes sans dupliquer le nombre de sommets.

3.4.3 Processus d'optimisation

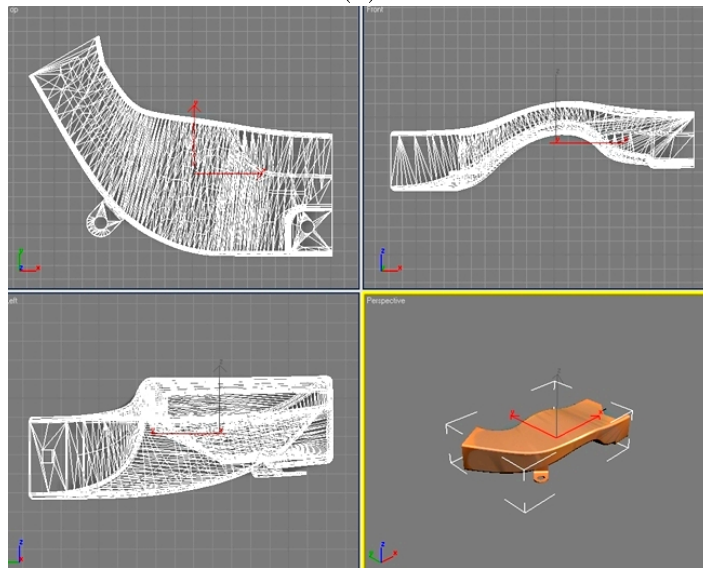
Selon la finalité de l'application et la complexité de la scène finale, il peut s'avérer indispensable d'optimiser le nombre de polygones. En effet, certaines parties des maquettes sont nécessaires pour la visualisation de la scène virtuelle, mais n'ont pas un rôle direct dans l'interaction. Par exemple, si l'on veut tester l'accessibilité d'une lampe dans un boîtier situé en environnement moteur, il est nécessaire d'optimiser les parties de la maquette situées dans la zone d'accessibilité. Les parties qui ne sont pas directement impliquées dans la tâche peuvent avoir un nombre de polygones moins important. Il en est de même pour les aspects physiques. Ainsi, les parties non impliquées dans l'interaction n'ont pas besoin d'être physicalisées.

De nombreux algorithmes ont été développés concernant la réduction du nombre de polygones. Heckbert et al.[65], Schroeder et al. [137] et Renze et al.[126] ont proposé plusieurs techniques qui s'appuient sur le nombre de sommets désirés. Ces techniques sont basées sur l'emploi d'opérateurs de fusion d'arrêtes [72] ou de remaillage d'un contour après suppression de sommets [123, 151]. Dans le cadre des travaux présentés dans ce manuscrit, cette méthode de réduction a été utilisée.

Différents paramètres du logiciel de modélisation (3DS Max 8.0) permettent de diminuer le nombre de polygones d'une maquette virtuelle. Cependant, sans modification des paramètres initiaux (paramètres de soudage, angles entre les polygones, etc.), cette réduction peut engendrer des déformations de la maquette.



(a)



(b)

FIGURE 3.4 – Illustration de la phase de triangulation des modèles issus de la CAO : (a) modèle CAO visualisé sous Catia V5, (b) modèle exporté et importé sur 3D Studio Max 8.0.

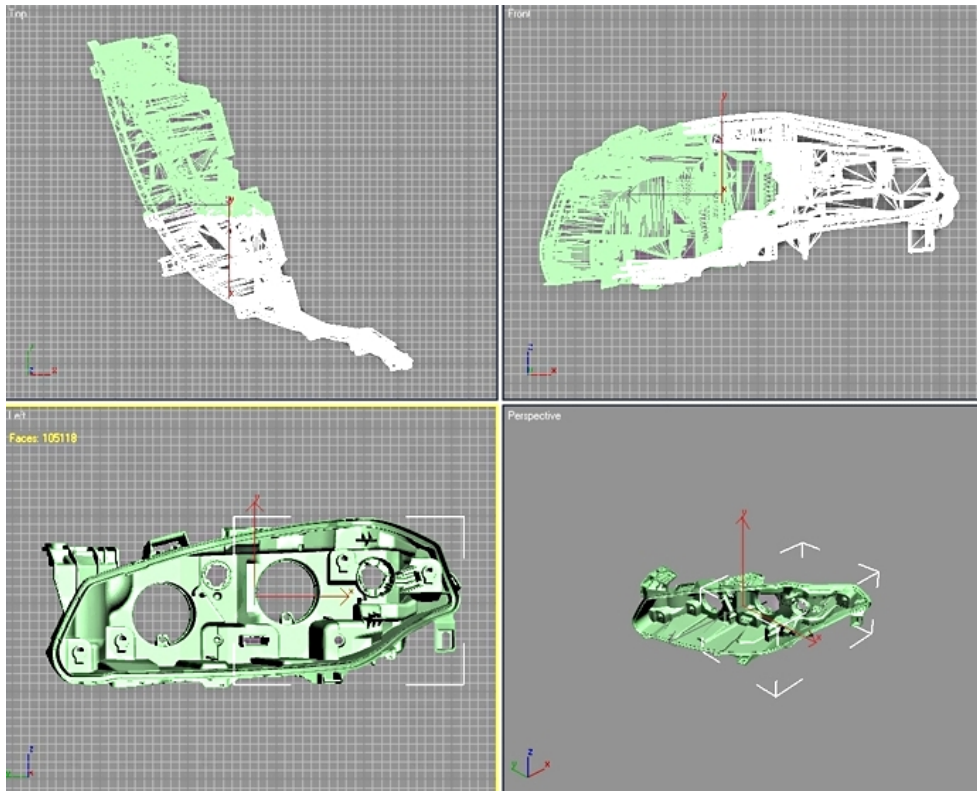
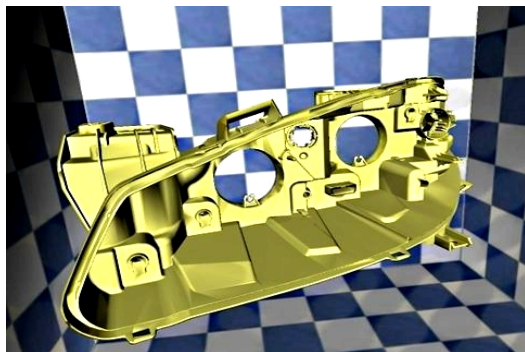
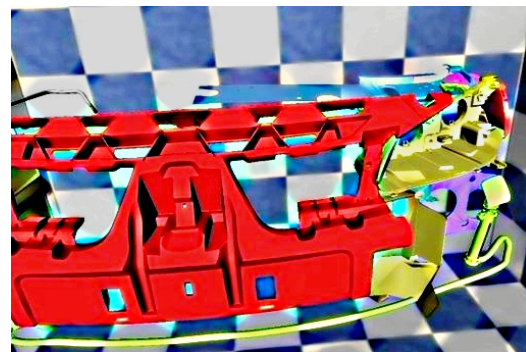


FIGURE 3.5 – Illustration de la maquette virtuelle d'un boîtier subissant le processus d'optimisation basé sur une division en deux parties.



(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Exemples de modèles CAO intégrés dans une application 3D temps réel : (a) boîtier de phare et (b) ensemble cohérent de pièces avant d'une calandre.

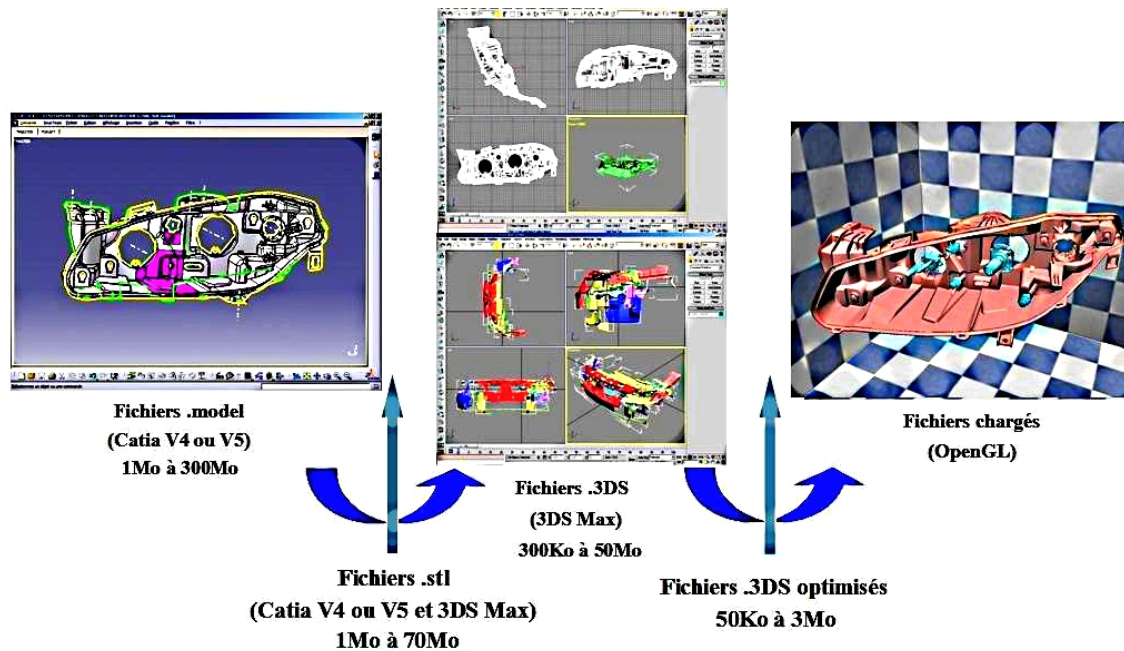


FIGURE 3.7 – Vue d’ensemble de la méthodologie de transformation des données.

Il est possible dans certains cas, généralement pour les maquettes virtuelles complexes, d’accélérer le processus d’optimisation en la divisant en deux parties. Le processus est alors appliqué séquentiellement à chacune des parties. La **figure 3.5** illustre une maquette virtuelle comportant 110000 polygones. Chaque sous-partie de cette maquette comporte 55000 polygones.

3.4.4 Visualisation en environnement virtuel

A ce stade du processus, les maquettes virtuelles optimisées sont chargées dans une application temps-réel permettant de les visualiser en réalité virtuelle (visualisation stéréoscopique, échelle 1 : 1, etc.). Nous proposons d’utiliser un *loader 3D* qui permet de convertir une maquette virtuelle au format **.3DS** en données directement exploitables (liste de sommets, liste des polygones, matériaux, textures, etc.) par la carte graphique.

La méthode de transformation et de visualisation des maquettes virtuelles a été validée par le bureau d’études de Valeo Lighting Systems (Angers). La **figure 3.6** montre un boîtier et une calandre intégrés dans un environnement temps-réel. La **figure 3.7** illustre une vue d’ensemble de la méthodologie proposée. On remarque que le poids (Mo) et la taille (nombre de polygones) des maquettes virtuelles finales sont nettement inférieurs à celui des maquettes numériques originales.

3.5 Processus de physicalisation

L'interaction avec des maquettes virtuelles complexes nécessite un algorithme de détection de collisions et une technique de rendu dynamique efficaces. Le processus de physicalisation est une étape importante qui s'inscrit dans le processus de transformation et de modification successives de la maquette virtuelle.

Différentes approches basées sur des solutions académiques ont été proposées [43, 90], mais ne répondaient pas pleinement à notre cahier des charges, en terme de pérennité, d'efficacité et de portabilité. L'approche que nous avons retenue est basée sur l'utilisation d'un moteur physique professionnel satisfaisant à ces contraintes. Cette approche nécessite des ressources relativement importantes en termes de calcul et peut engendrer une baisse de performances et en particulier une réduction de la fréquence de rafraîchissement des images [100]. Le choix du moteur physique approprié au type de simulation envisagé est fondamental. Les critères à prendre en compte sont en particulier la puissance intrinsèque, la stabilité, la pérennité, les potentiels d'évolution, la facilité de prise en main et d'utilisation.

3.5.1 Moteurs physiques

En 2000, Lander et al. [90, 91] ont comparé trois moteurs physiques : *IpionTM*, *MathEngineTM* et *HavokTM*. Douze tests différents ont été effectués, notamment sur la détection de collisions et la gestion des contraintes. D'autres tests réalisés par les mêmes auteurs ont permis de comparer les qualités intrinsèques des moteurs physiques, comme la facilité de prise en main et d'intégration. En 2006, Seugling et al. [139] ont évalué dix moteurs physiques (*Open Dynamics EngineTM*, *DynamechsTM*, *OpenTissueTM*, *Newton Game DynamicsTM*, *TokamakTM*, *BulletTM*, *True AxisTM*, *NovodeXTM*, *CM-labsTM*, *VortexTM* et *HavokTM*). Ils ont été comparés suivant trois paramètres : caractéristiques intrinsèques, documentation et prise en main. Les trois moteurs les plus performants sont : *NovodeXTM*, *Open Dynamics EngineTM*, et *Newton Game DynamicsTM*. Les auteurs ont mis l'accent sur le fait que le moteur physique *NovodeXTM* (actuellement *PhysXTM*) est le plus stable car il utilise un format de données *.pmap* spécifique. Plus précisément, *PhysXTM* permet d'associer à chaque objet 3D chargé en mémoire un modèle physique. Celui-ci est stocké sous la forme d'un fichier *.pmap*.

3.5.2 Approche proposée

Nous décrivons ici l'approche que nous proposons pour la physicalisation des maquettes virtuelles. Comme l'illustre la **figure 3.8**, le processus de physicalisation fait suite à la phase d'optimisation des maquettes virtuelles. Celui-ci, initialement développé pour les maquettes virtuelles, a été étendu à l'intégration de modèles biomécaniques (représentation de l'opérateur dans l'environnement virtuel).

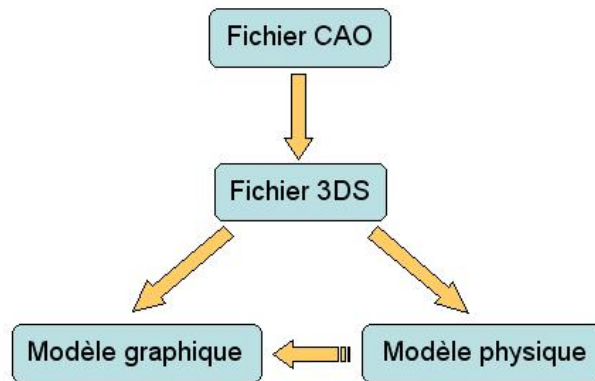


FIGURE 3.8 – Illustration du processus de tranformation et de physicalisation des maquettes numériques (fichier CAO) en maquettes virtuelles (fichier 3DS). Le modèle physique est représenté par un modèle graphique.

3.5.2.1 Modèles physiques non-articulés

Deux approches peuvent être envisagées par les moteurs physiques : la première, illustrée à la **figure 3.9** est basée sur un modèle physique créé à partir de primitives (cubes, sphères, etc). Le nombre de primitives peut varier selon la complexité du modèle et la précision requise par la simulation.

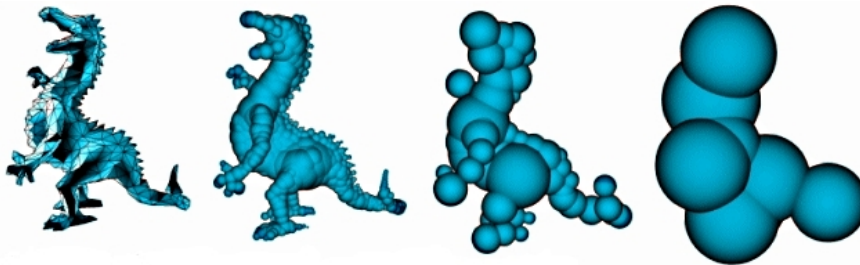


FIGURE 3.9 – Représentation physique à base de primitives (sphères).

La deuxième approche repose sur l'utilisation directe du maillage pour générer le modèle physique. Cette approche permet d'avoir des cohérences topologiques et géométriques maximales entre les modèles graphiques et les modèles physiques. En outre, elle offre une facilité d'intégration beaucoup plus simple.

Solution proposée Afin de respecter au mieux le cahier des charges fourni par Valeo Lighting Systems, nous avons choisi de baser nos travaux sur cette deuxième approche et en particulier sur l'utilisation du moteur physique NovodeXTM (actuellement nommé PhysXTM). En effet, il regroupe simultanément les caractéristiques suivantes :

- puissance intrinsèque,
- facilité d'intégration et d'utilisation,

- potentiel d'évolution important (actuellement porté par NVIDIATM),
- calcul du fichier *.pmap* une fois pour toutes.

Le moteur physique NovodeXTM offre deux possibilités distinctes pour le comportement dynamique des modèles. Dans le premier cas, leur comportement est entièrement géré par le moteur physique. Dans le deuxième, celui-ci est géré par l'utilisateur, et deux options sont alors possibles :

- les modèles sont *figés* : leur position et leur orientation sont fixes dans l'environnement,
- les modèles sont *animés* : leur position et leur orientation sont pilotées via le flux de données issu du système de capture de mouvement.

Notons qu'une maquette ou un prototype virtuels sont généralement composés de plusieurs modèles 3D et donc d'autant de modèles physiques (fichiers *.pmap*).

Validation de la solution La validation de la solution choisie passe par l'étude du temps de physicalisation des maquettes virtuelles. Celui-ci dépend du nombre total de polygones composant la maquette virtuelle. Nous avons montré que le temps de physicalisation était, à nombre de polygones constant, quasiment identique pour une maquette composée d'un seul ou de plusieurs modèles.

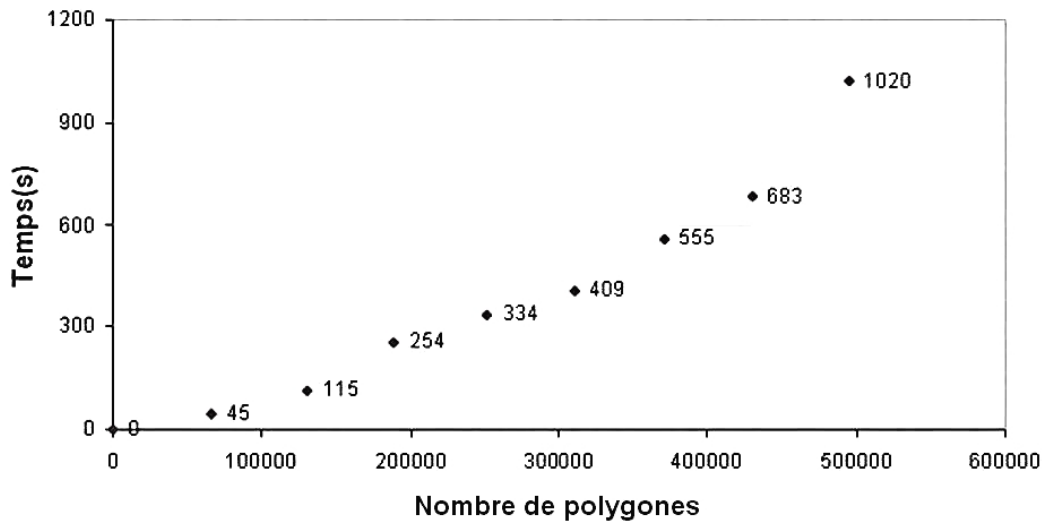


FIGURE 3.10 – Evolution du temps de physicalisation d'une maquette virtuelle en fonction du nombre de polygones.

La **figure 3.10** illustre l'évolution du temps de physicalisation d'une maquette virtuelle en fonction du nombre de polygones qu'elle contient. On observe que le temps de physicalisation croît de manière non-linéaire avec l'augmentation du nombre de polygones. Dix-sept minutes environ sont nécessaires pour physicaliser une maquette de 500000 polygones, avec une station de travail de type Pentium 4 dotée d'un processeur monocore cadencé à 3,2 GHz et possédant 2

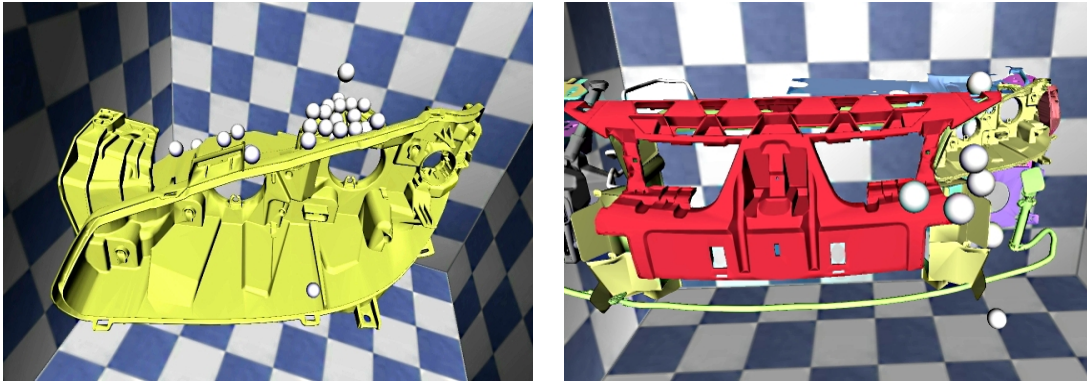


FIGURE 3.11 – Illustration de maquettes virtuelles physicalisées, impactées par des sphères soumises à la gravité : (a) boîtier et (b) calandre.

Go de mémoire vive. Les stations de travail ayant une puissance de calcul en perpétuelle croissance (principalement due au perfectionnement des architectures et à l'augmentation du nombre de coeurs), les temps de physicalisation d'une maquette complexes seront, dans un futur proche, encore plus courts. La **figure 3.11** illustre des maquettes virtuelles physicalisées, impactées par des sphères soumises à la gravité. Ces simulations ont permis une première validation du processus de physicalisation de maquettes virtuelles. Dans la suite de ce chapitre, nous appliquons ce processus à des modèles articulés, notamment des modèles biomécaniques qui permettent une intégration physique de l'opérateur dans l'environnement virtuel.

3.5.2.2 Modèles physiques articulés

Un modèle articulé est constitué de plusieurs parties connectées par des liaisons mécaniques contraintes possédant un ou plusieurs degrés de liberté. Les modèles que nous considérons sont des modèles hiérarchisés : la position et l'orientation de chaque élément influence directement la position et l'orientation des éléments suivants dans la hiérarchie du modèle. Par exemple, l'orientation des phalanges distales d'une main virtuelle dépend de l'orientation des phalanges précédentes, qui dépendent à leur tour de la position et de l'orientation de la paume de la main dans le repère global. Dans notre étude, nous proposons de représenter l'avatar de l'opérateur par un modèle biomécanique tronqué, ne prenant en compte qu'une partie de l'avant bras et la main constituée de 14 ddl.

L'interaction avec une maquette ou un prototype virtuel exige une intégration physique (totale ou partielle) de l'opérateur dans l'environnement virtuel. Cette intégration repose en particulier sur l'animation temps-réel et la physicalisation d'un avatar. Celui-ci est constitué d'un modèle 3D hiérarchisé (modèle biomécanique). Différentes approches d'intégration d'une main articulée ont été proposées. En 2005, Pouliquen et al. [122] ont proposé une approche basée sur un contrôle en effort via le moteur physique VortexTM. Le modèle proposé était constitué de primitives géométriques (parallélépipèdes). Des liaisons pivots ont

été définies entre chaque phalange. Une double liaison pivot a été définie pour lier la paume aux doigts. Enfin, une liaison rotule a été définie pour la première phalange du pouce. Un gant de données *CyberGloveTM* à 22 capteurs a été utilisé pour mesurer les angles articulaires (modèle cinématique direct). Afin que chaque phalange soit orientée suivant l'angle désiré, un couple a été appliqué sur chaque liaison du modèle mécanique.

Les mêmes auteurs ont proposé une autre approche basée sur un modèle cinématique inverse. La flexion et l'orientation des doigts ont été déterminées via le système de capture de mouvement *ViconTM* (caméras infrarouges). Comme précédemment, des couples ont été appliqués sur les liaisons du modèle mécanique. Les résultats obtenus ont révélé une latence importante, même avec des formes géométriques simples et en nombre limité.

Dans le même contexte, Borst et al. [17] ont présenté une approche basée sur l'utilisation de primitives paramétriques avancées : les *swept spheres volumes* (SSV) [92]. Trois types de SSV ont été définis par Larsen et al. : les *point swept sphere* (PPS) définies par un point et un rayon, les *line swept sphere* (LSS), définies par un segment, un centre et un rayon (cylindre aux extrémités arrondies) et les *rectangle swept sphere* (RSS), définies par un rectangle, un centre et un rayon (parallélépipède régulier aux arêtes arrondies). Un modèle de main, basé sur un ensemble de liaisons rotules et pivots, a été proposé. L'animation de ce modèle a été réalisée en cinématique inverse, à l'aide du gant *CyberGloveTM*. Comme précédemment, un couple a été appliqué sur les liaisons afin d'orienter les phalanges. Cependant, le comportement dynamique de la main est basé sur le moteur physique *NovodeXTM*. Les résultats ont révélé une certaine instabilité des liaisons. Ces auteurs ont aussi proposé l'utilisation d'un maillage, associé à un fichier *.pmap*, pour chaque phalange. Les résultats n'ont pas non plus été satisfaisants.

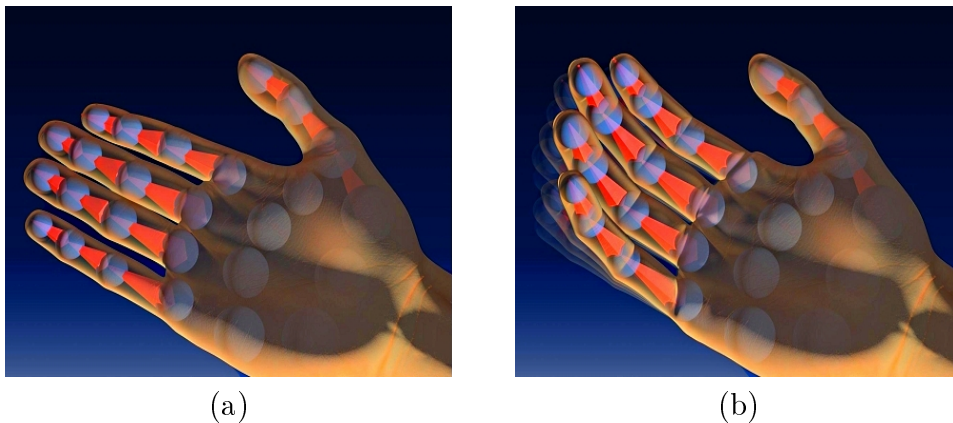


FIGURE 3.12 – Illustration de la modélisation physique de la main humaine proposée par Holtz : (a) main à plat et (b) fermeture des doigts.

Plus récemment, Holz et al. [71] ont proposé une approche différente, basée sur la représentation graphique réaliste d'une main. Celle-ci prend en compte la

déformation de la peau lors de la flexion des doigts. L'animation de la main est réalisée grâce à une structure mécanique hiérarchisée (squelette). La déformation de la peau est basée sur la technique du *skinning*. Cette technique consiste à connecter chaque point du maillage à une partie du squelette, en pondérant l'influence de celui-ci lors des mouvements des doigts. Ainsi, un maillage unique est utilisé pour modéliser la main. Cette approche révèle des incohérences au niveau de la déformation de la peau, lorsque la pondération n'est pas parfaite. Pour la représentation physique de la main, Holz et al. ont choisi de physicaliser uniquement les liaisons et les extrémités des doigts (**Figure 3.12**). On observe que la représentation physique ne respecte pas la représentation graphique. Cependant, cette modélisation peut suffire pour la préhension en temps-réel d'objets de différentes formes. Cependant, dans notre contexte applicatif, celle-ci n'est pas suffisante et ne permet pas de détecter les collisions sur l'ensemble de la main.

Solutions proposées En ce qui nous concerne, trois approches ont été étudiées. La première est basée sur la modélisation physique proposée par Pouliquen et al. [122] et Borst et al. [17], en utilisant une version plus récente du moteur physique NovodeXTM. La deuxième est basée sur l'utilisation d'un squelette associé à un maillage unique et reprend la technique du *skinning*. La troisième est aussi basée sur un squelette permettant d'animer des éléments distincts (phalanges) via la librairie open source CAL3D [6].

Première approche Dans cette première approche, nous avons repris la première solution proposée par Pouliquen et al. [122] (modèle géométrique direct). Cependant, nous avons utilisé comme l'ont fait Borst et al. [17], le moteur physique NovodeXTM, dans une version plus récente. Les résultats ont été relativement satisfaisants. Nous n'avons pas noté d'instabilité lors de petits mouvements de la main ou des doigts. Toutefois, les liaisons deviennent trop élastiques lors de mouvements plus rapides, ce qui engendre des incohérences entre la main réelle et le modèle articulé.

Deuxième approche La deuxième approche reprend la technique du *skinning* envisagée par Holz et al. [71] (**Figure 3.13 (a)**). Des essais réalisés sous le logiciel 3DS Max 8.0, ont mis en évidence des déformations trop importantes de la peau (**Figure 3.13(b)**). Le modèle physique généré à partir du maillage de la main étant non déformable, une cohérence parfaite entre celui-ci et le modèle graphique n'est pas réalisable.

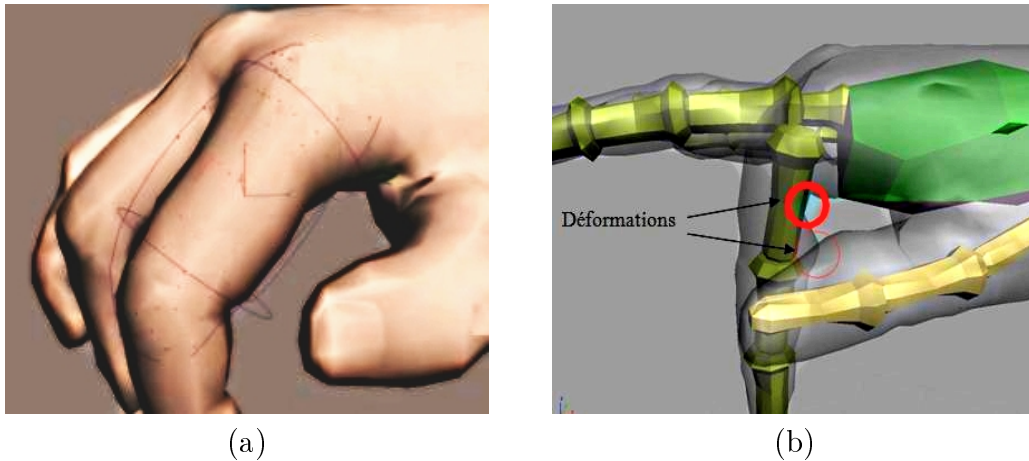


FIGURE 3.13 – Main virtuelle modélisée via la techniques du skinning : (a) main articulée avec déformation de la peau et (b) mise en évidence de défaut de pondération sur le maillage.

Troisième approche Cette approche, illustrée sur la **figure 3.15** nécessite une préparation des modèles, qui repose sur l'utilisation de la librairie CAL3D. Aucune pondération entre le maillage et le squelette n'est nécessaire, car les phalanges sont modélisées séparément. L'avant-bras, la paume ainsi que chaque phalange du modèle de la main sont importés ou modélisés, puis ajustés sur un squelette créé via le logiciel 3DS Max 8.0. Les points de pivot des phalanges correspondent aux points de pivot des liaisons définies par le squelette. La **figure 3.14 (a)** montre la correspondance entre le squelette et les différentes parties de la main. La **figure 3.14 (b)** montre le résultat final. L'export du squelette se fait à partir du logiciel 3DS Max 8.0, via un plug-in Cal3D. Ce plug-in permet d'exporter ce squelette sous la forme d'un fichier de configuration (format .cfg) qui contient son nom (skeleton.xsf), le nom des fichiers associés aux différents maillages (*mesh1.xmf*, *mesh2.xmf*, ... , *meshn.xmf*), ainsi que le nom des fichiers (*mesh1.xrf*, *mesh2.xrf*, ... , *meshn.xrf*) associés aux matériaux (ambient, diffuse, specular, et shininess).

Les fichiers correspondants aux différents maillages (avant-bras et main) sont exportés séparément au format *.3DS* (*mesh1.3ds*, *mesh2.3ds*, ... , *meshn.3ds*). Ces maillages subissent le processus de physicalisation décrit précédemment. La librairie CAL3D permet de lire le contenu des fichiers relatifs au squelette et d'animer celui-ci ainsi que les modèles physiques associés (*mesh1.pmap*, *mesh2.pmap*, ... , *meshn.pmap*) aux maillages, grâce à un système de capture de mouvement. La **figure 3.16** illustre le modèle articulé physicalisé d'un avant-bras et d'une main, tandis que la **figure 3.17** illustre les différentes phases de saisie d'objets physicalisés, à l'aide de la main articulée.

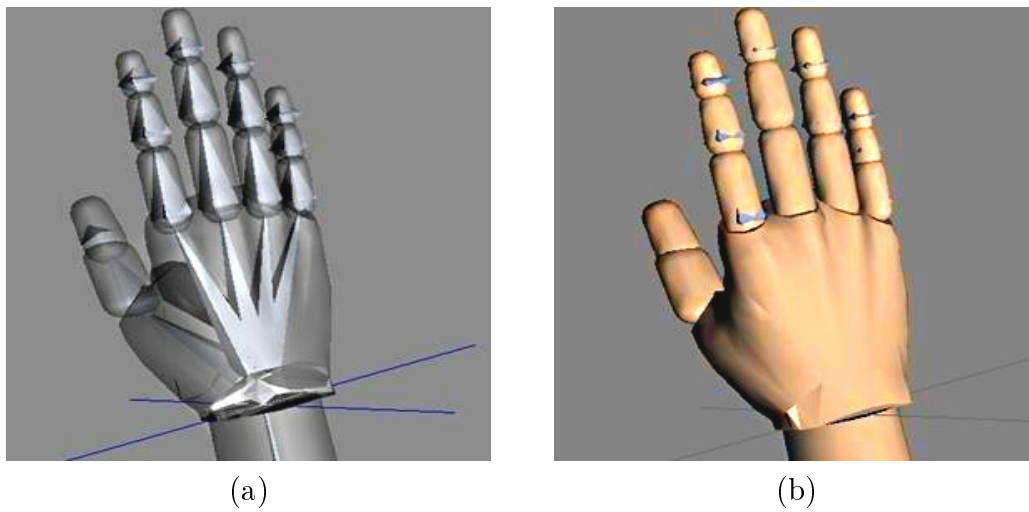


FIGURE 3.14 – Illustration d’une main virtuelle articulée : (a) visualisation du squelette et (b) modèle complet.

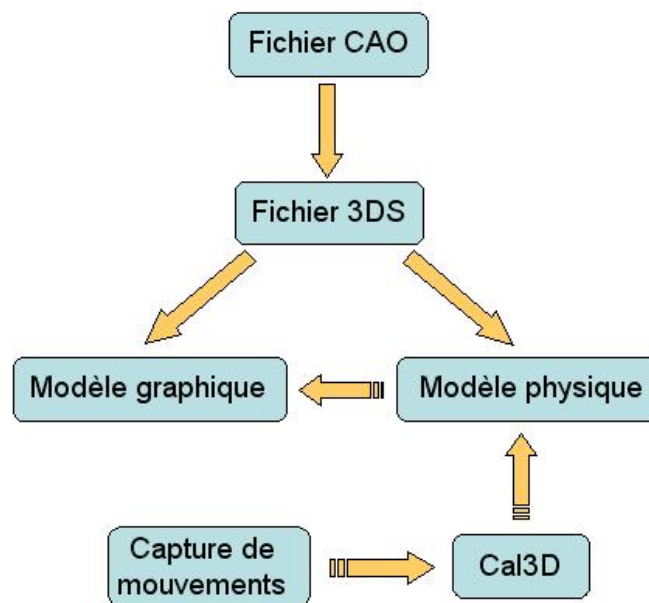


FIGURE 3.15 – Illustration du processus de physicalisation des modèles biomécaniques.

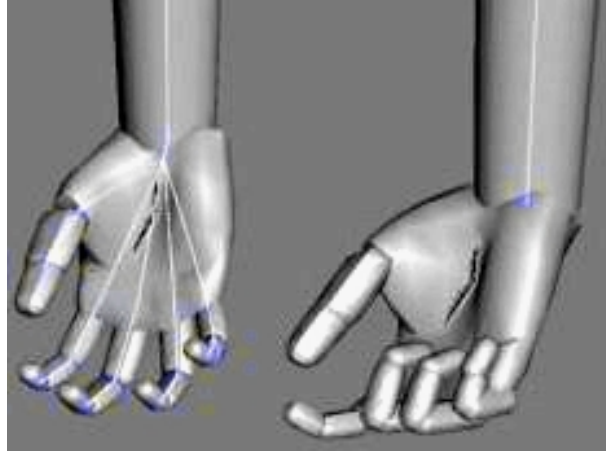


FIGURE 3.16 – Modèle dynamique physicalisé soumis en position et en orientation au squelette exploité via Cal3D.

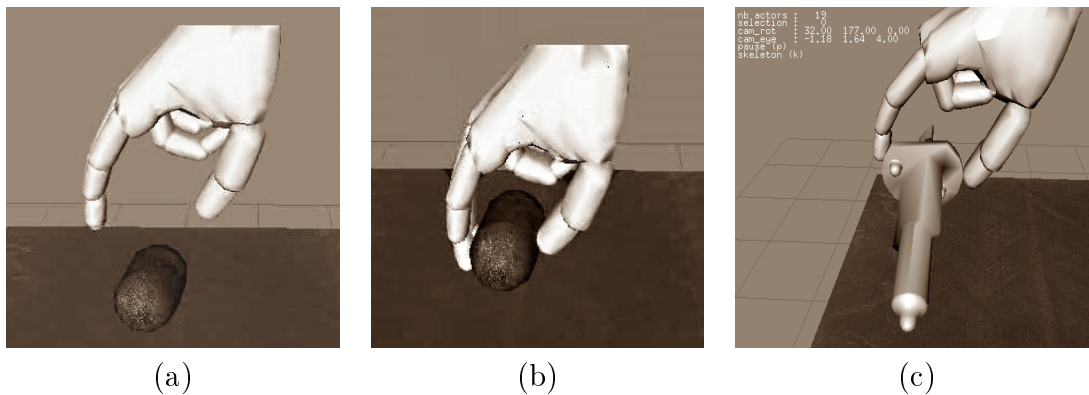


FIGURE 3.17 – Illustration des phases de saisie d'objets physicalisés : (a) main en approche d'une capsule, (b) saisie stable de la capsule et (c) manipulation d'une lampe.

3.6 Rendu haptique

Cette partie est consacrée au rendu haptique lors d'interaction avec les maquettes ou prototypes virtuels. Nous commençons par une description succincte des méthodes classiques de détection de collisions associées. Puis, nous décrivons l'approche que nous avons développée, basée sur la méthode par pénalité.

3.6.1 Techniques de rendu haptique

Les différentes techniques de rendu haptique sont basées sur deux méthodes : la *méthode par pénalité* ou la *méthode par contrainte*.

3.6.1.1 Méthodes par pénalité

Ces méthodes ont été introduites en 1994 par Massie et al. [101]. Celles-ci permettent de calculer une intensité et une direction de force en fonction de l'interpénétration d'objets. Par exemple, lorsqu'une sphère pénètre un plan virtuel selon une direction normale à celui-ci, la direction de la force appliquée (retour d'effort) sera normale au plan. L'intensité de cette force sera inversement proportionnelle à la distance entre le centre de la sphère et le plan selon une loi mathématique définie. En utilisant des formes simples à base de primitives, les méthodes par pénalité fonctionnent très bien, et sont faciles à implémenter. Cependant, la complexité géométrique des maquettes virtuelles rend cette méthode plus difficile à mettre en oeuvre. Plusieurs approches ont été proposées concernant le calcul du retour d'effort en fonction de l'interpénétration des objets [33, 57, 59, 82, 83, 104, 112].

3.6.1.2 Méthodes par contrainte

En 1995, Zilles et al. [160] ont introduit une méthode par contrainte appelée *God-Object*. Cette méthode consiste à calculer à tout moment la distance entre deux points, l'un représentant l'extrémité d'un dispositif haptique et l'autre étant situé sur la surface d'un objet virtuel. L'écart entre ces deux points donne la direction et l'intensité de la force à appliquer. Cette méthode a l'avantage d'appliquer une force avant que le point représentant l'extrémité du dispositif haptique et l'objet ne soient en contact. Aucune interpénétration n'est possible. De nombreuses extensions de cette méthode ont été proposées [69, 104, 33, 110, 111].

3.6.2 Approche proposée

Notre approche pour la détection de collisions et le rendu haptique est basée sur l'utilisation du moteur physique NovodeXTM. Celui-ci offre la possibilité de prédéfinir des paires d'objets susceptibles d'entrer en collision lors de la simulation. Ainsi, dans la boucle de rendu, nous regardons l'état de la variable que nous associons à chaque paire d'objets. Trois types d'événements peuvent alors être identifiés :

- début du contact (*start · touch*),
- interpénétration des modèles (*on · touch*),
- fin de l'interpénétration (*end · touch*)

Ces événements peuvent être associés à différents retours sensoriels (visuels, sonores, tactiles ou kinesthésiques) qui permettent de renforcer la perception des collisions et ainsi d'améliorer la performance de l'utilisateur lors d'interactions avec les maquettes ou les prototypes virtuels.

Par exemple, pour une simulation d'accessibilité et d'extraction de lampes en environnement moteur, des paires (*avatar - pièces*) du prototype doivent être définies. Lorsque l'avatar de l'opérateur (main, curseur, etc.) entre en collision avec une des pièces du prototype, le moteur physique fournit l'identifiant ainsi que la direction de la normale (dans le repère global) de chaque polygone de la pièce impactée, impliqué dans la collision. La norme de la force d'impact F_i est calculée à partir de l'équation (3.1) :

$$F_i = k.v \sin(\alpha) \quad (3.1)$$

Dans cette équation, k est une constante arbitraire déterminée de manière empirique. Afin de ne pas s'opposer aux mouvements tangentiels de l'opérateur, nous proposons que la force d'impact F_i soit proportionnelle à la vitesse v de l'avatar avant la collision, ainsi qu'au sinus de l'angle d'impact α . La vitesse v est calculée à partir de valeurs successives de la position de l'avatar avant l'impact. Par exemple, soit $P(x, y, z)$, la position de l'avatar à l'instant t et $P_{-10}(x, y, z)$ sa position à l'instant t_{-10} , la vitesse v est donnée par l'équation (3.2) :

$$v = \frac{P(x,y,z) - P_{-10}(x,y,z)}{\Delta t} \quad (3.2)$$

La **figure 3.18 (a)** illustre un exemple dans lequel un avatar (ici une sphère) entre en collision avec une surface plane composée d'un polygone dont la normale est dirigée vers le haut. La sphère a une vitesse v , et un angle d'impact α . Dans ce cas, la force \vec{F}_i aura la même direction et la même orientation que la normale à la surface. Un autre exemple dans lequel la sphère (avatar) entre en collision avec une surface non plane, composée d'un nombre élevé de polygones, est illustré à la **figure 3.18 (b)**. La direction de la force \vec{F}_i est calculée à partir de la résultante des normales des polygones impliqués dans la collision. L'impact met en jeu un nombre limité de polygones d'une surface non plane.

Afin d'augmenter le réalisme des simulations, nous avons implémenté une force additionnelle F_p , proportionnelle à la pénétration de l'avatar dans la pièce impactée (méthode par pénalité). Nous proposons que cette pénétration soit calculée à partir du nombre N_s de sommets impliqués dans la collision, comme l'illustre

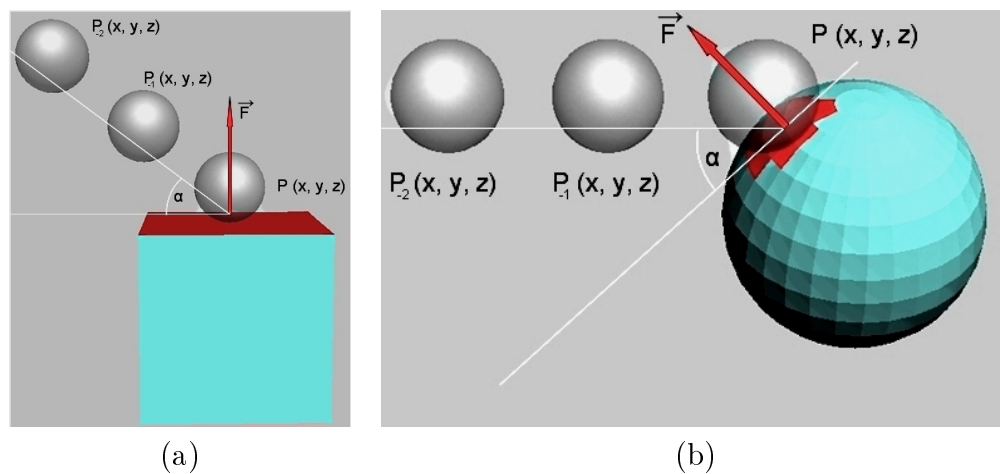


FIGURE 3.18 – Illustration de la direction de la force d’impact lors de la collision d’une sphère (avatar) avec deux types de surfaces : (a) une surface plane et (b) une surface non plane.

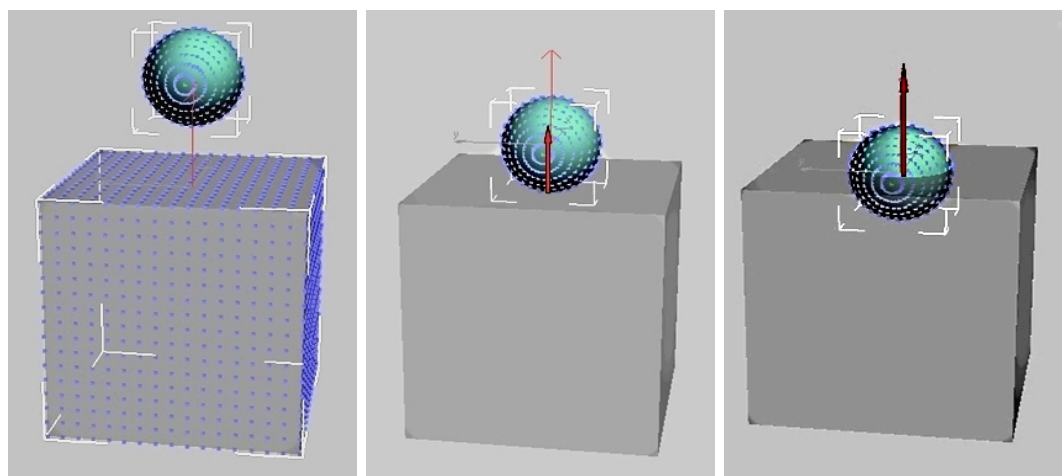


FIGURE 3.19 – Illustration de la force F_p , fonction du nombre N_s de sommets impliqués dans l’interpénétration de l’avatar (sphère) et d’un parallélépipède rectangle.

la **figure 3.19**. Ainsi, la force F_p est donnée par l'équation (3.3), dans laquelle K est une constante arbitraire déterminée de manière empirique. La norme de la force résultante, pendant l'interpénétration est donnée par l'équation (3.4).

$$F_p = K.N_s \quad (3.3)$$

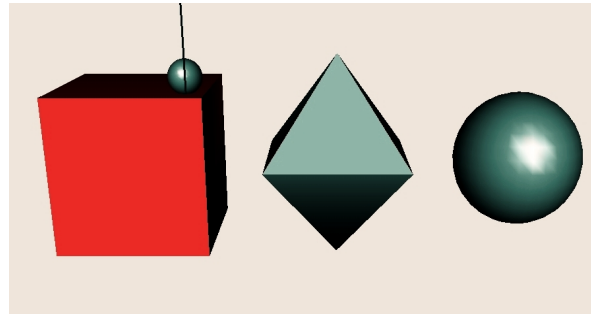
$$F = F_i + F_p \quad (3.4)$$

Cette approche a été testée, dans un premier temps, avec différentes primitives géométriques. La direction de la force désirée est respectée pour le cas d'une collision avec une seule surface comme pour le cube (**Figure 3.20 (a)**) et l'octaèdre (**Figure 3.20 (b)**) ainsi que dans le cas d'une collision impliquant plusieurs polygones (**Figure 3.20 (c)**). La direction de la force \vec{F} est représentée par un trait noir. La primitive impactée devient rouge dès l'impact de l'avatar (*starttouch*), permettant ainsi d'avoir une substitution visuelle du retour tactile.

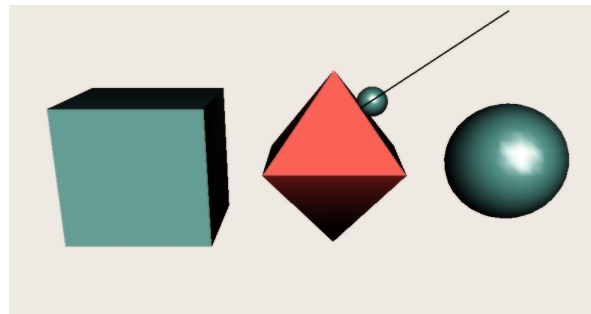
3.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simplification, la physicalisation et le rendu haptique de maquettes virtuelles issues de maquettes numériques, ainsi qu'à l'intégration physique des modèles biomécaniques humains. Après une revue des méthodes et des outils existants, nous avons proposé une méthodologie de traitement des données permettant une cohérence maximale entre les modèles graphiques et les modèles physiques (calcul des collisions, comportement dynamique). Nous avons procédé à une première validation de cette méthodologie, en analysant le temps de physicalisation des maquettes virtuelles en fonction de leur complexité. Nous avons montré en particulier que le temps de physicalisation des données n'était pas un facteur limitant pour le processus global. Notre méthodologie a également été validée par l'entreprise Valeo Lighting Systems (Angers), en terme de (i) respect de la topologie et géométrie initiales des maquettes, (ii) d'extension de la chaîne de conception, et (iii) de pérennité et de capacité d'évolution. Cette méthodologie est en effet indépendante du logiciel de CAO utilisé, et repose uniquement sur un format d'échange de données standard (.stl ou compatible). En outre, elle est efficace quelles que soient la taille et la complexité des maquettes numériques initiales, ce qui lui confère un caractère générique.

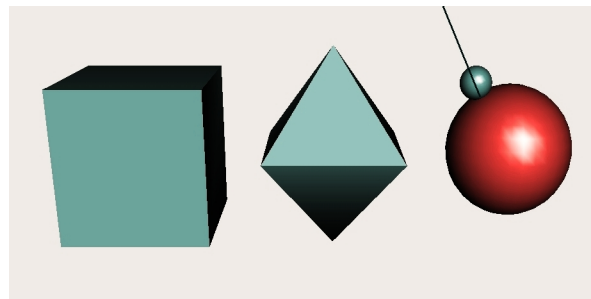
Enfin, nous avons proposé et validé une méthode de rendu haptique permettant à un opérateur de percevoir les maquettes virtuelles de manière haptique (tactile et/ou kinesthésique). Dans le chapitre suivant, nous présentons notre plate-forme de simulation et procédons à la validation de notre approche, à travers différentes simulations à échelle 1:1 impliquant des maquettes virtuelles complexes.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.20 – Illustrations visuelles du retour d'effort lors de tests interactifs impliquant différentes primitives géométriques : (a) cube, (b) octaèdre et (c) sphère.

Chapitre 4

Simulation et validation de la méthodologie d'intégration

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons proposé une méthodologie pour la simplification et la physicalisation de maquettes numériques. Cette méthodologie autorise, en outre, l'intégration de modèles biomécaniques permettant à l'utilisateur d'interagir avec ces maquettes de manière réaliste (manipulation de pièces, rendu haptique, etc.). L'objectif de ce chapitre est de valider cette méthodologie à travers différentes simulations permettant de valider et d'analyser la performance de notre plate-forme dans différents types de tâches (accessibilité, manipulation et extraction de pièces mécaniques). Nous analysons en particulier l'influence de la surcharge de calcul engendrée par les collisions et les retours sensoriels associés, sur la fréquence de rafraîchissement des images. Dans un premier temps nous présentons la plate-forme de réalité virtuelle et en particulier la configuration visuo-haptique mise en oeuvre. Puis nous décrivons différentes simulations impliquant des maquettes et prototypes virtuels complexes basés sur des maquettes numériques fournies par Valeo Lighting Systems (Angers).

4.2 Plate-forme de réalité virtuelle

Cette section présente la plate-forme de réalité virtuelle illustrée à la **figure 4.1**. Celle-ci est basée sur une configuration visuo-haptique non-intrusive permettant d'interagir à échelle 1 : 1 avec des maquettes ou prototypes virtuels. Cette plate-forme est dotée d'un système d'affichage stéréoscopique avec rétro-projection des images, de différents systèmes de capture de mouvement, de divers périphériques d'interaction et interfaces haptiques. La plate-forme repose en particulier sur l'utilisation d'une interface à retour d'effort à câbles (*SPIDAR*). Son architecture était dans un premier temps basée sur une station de travail Intersed Computer, équipée d'un biprocesseur Intel Xeon cadencé à 3 Ghz (bus cadencé à 800 MHz), de 512 Mo de mémoire vive et d'une carte graphique Nvidia Qua-

dro disposant de 128 Mo de mémoire. Afin d'augmenter la puissance de calcul et d'affichage de la plate-forme, nous avons évolué vers une station de travail HP WX6400 composée d'un biprocesseur Intel Xeon 5130, cadencé à 2 Ghz (bus cadencé à 1.33 GHz), de 4 Go de mémoire vive et d'une carte graphique MSI 8800 GTX disposant de 768 Mo de mémoire. Cette station de travail est reliée à deux vidéoprojecteurs de type BARCO IQ R300, placés derrière un écran semi-transparent (mur immersif) de 2 m x 2,5 m. La visualisation stéréoscopique repose sur l'utilisation de lunettes passives à filtres polarisants circulaires.

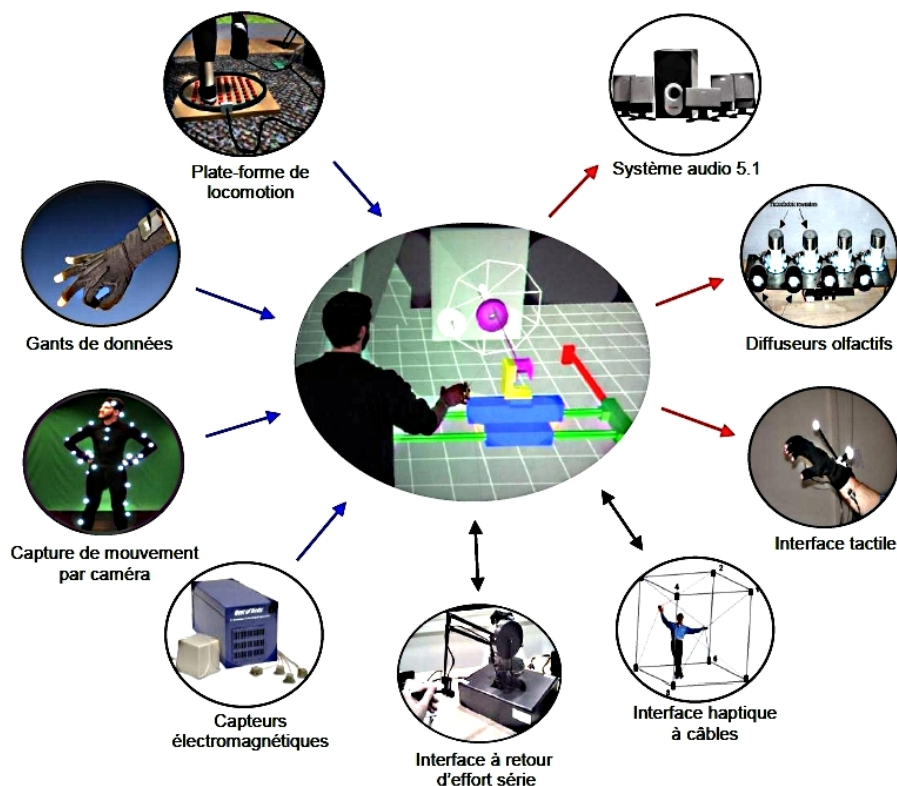


FIGURE 4.1 – Illustration de la plate-forme de réalité virtuelle : l'utilisateur est face à l'écran et dispose de différents périphériques d'interaction et interfaces haptiques.

4.2.1 Interface haptique à câbles

L'interface haptique à câbles (*SPIDAR*), intégrée à la plate-forme, permet d'appliquer des forces sur la main de l'utilisateur dans une enveloppe de travail relativement importante. Huit moteurs ont été disposés aux sommets d'un cube dans lequel l'utilisateur évolue. On associe à chaque moteur une poulie sur laquelle s'enroule un câble. La **figure 4.2** montre une configuration à quatre fils (main droite) ainsi qu'un actionneur constitué d'un moteur, d'une poulie et d'un encodeur optique.

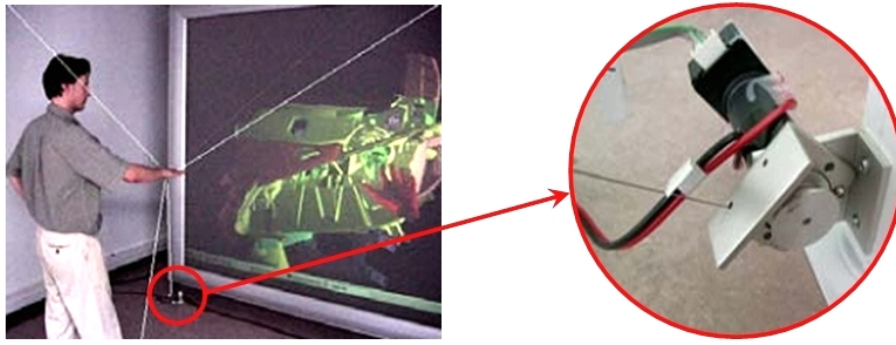


FIGURE 4.2 – Configuration à 4 câbles (main droite) et vue rapprochée d'un actionneur (moteur, poulie, et encodeur).

4.2.1.1 Espace de travail

L'espace de travail du *SPIDAR* implique deux espaces : (i) l'ensemble des points que le système peut atteindre (espace de travail en position), et (ii) l'ensemble des points où le système est capable d'appliquer une force dans n'importe quelle direction. On définit ce dernier espace comme l'espace haptique du *SPIDAR*. L'espace haptique pour la main droite est défini à la **figure 4.3(a)**, l'espace haptique pour la main gauche est défini à la **figure 4.3(b)**.

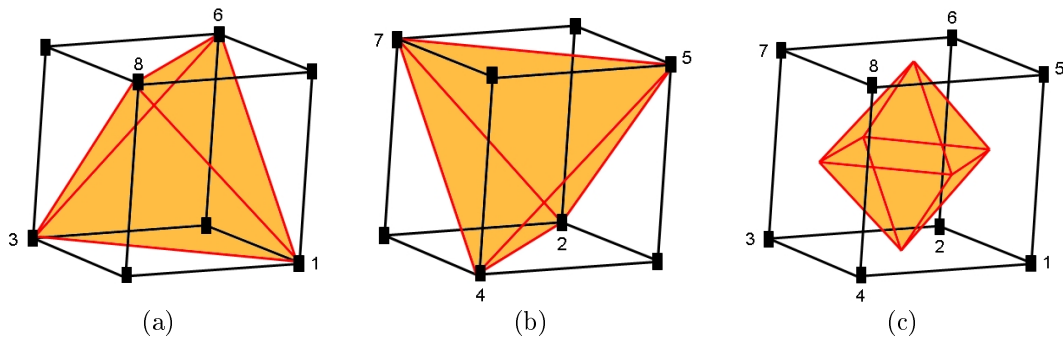


FIGURE 4.3 – Visualisation de l'espace haptique : (a) pour la main droite (4 câbles, moteurs 1-3-6-8), (b) pour la main gauche (4 câbles, moteurs 2-4-5-7) et (c) pour une configuration à 2x4 câbles (2 mains).

L'espace haptique du *SPIDAR* pour une configuration à 4 câbles (monomanuel) est un tétraèdre régulier. En configuration à 2x4 câbles (bimanuel), cet espace est défini par l'intersection des espaces haptiques de chaque main et forme un octaèdre régulier (**Figure 4.3(c)**). Les espaces haptiques illustrés sont théoriques et la force maximale que le système peut appliquer dépend de la distance entre son point d'application et le centre géométrique de l'espace haptique. Ainsi, lorsque le point d'application de la force s'éloigne du centre du système, celle-ci diminue. Lorsque le point d'application de la force appartient à l'un des plans qui définit l'espace haptique, l'amplitude de la force devient nulle.

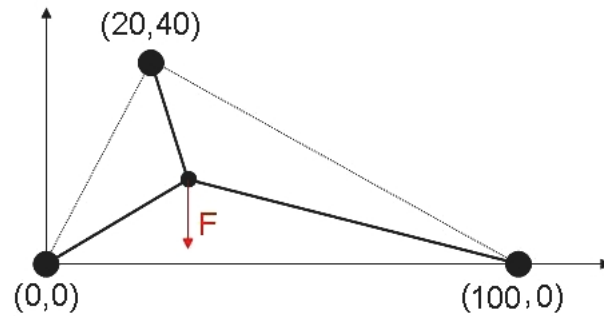


FIGURE 4.4 – Illustration du dispositif plan à deux dimensions équipé de trois moteurs.

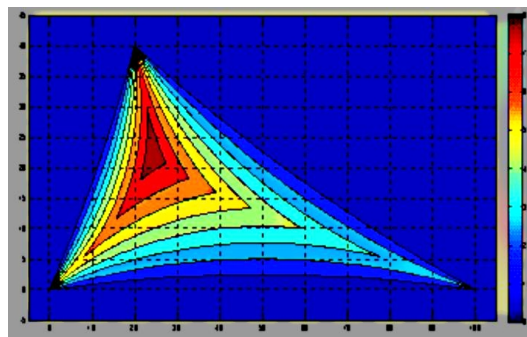


FIGURE 4.5 – Illustration de l'évolution de la force appliquée par le dispositif plan ci-dessus.

Afin de visualiser l'évolution de la force maximale que le système peut appliquer dans n'importe quelle direction, nous considérons un dispositif plan à deux dimensions équipé de trois moteurs situés aux positions $(0,0)$, $(20,40)$ et $(100,0)$ (**Figure 4.4**). L'espace haptique de ce dispositif est défini par le triangle formé par les trois moteurs. Les arêtes de ce triangle correspondent aux plans des espaces haptiques du *SPIDAR* et constituent la limite de l'espace haptique du dispositif. La **figure 4.5** illustre l'évolution de la force appliquée par ce dispositif plan sur un point situé à l'intérieur du triangle défini par les trois moteurs. Par exemple, celle-ci atteint 80% de sa valeur maximale quand son point d'application se situe dans la zone rouge foncée.

4.2.1.2 Mesure de la position

Une fois calibré (Annexe A), le *SPIDAR* permet de déterminer la position de la main (point concourant des câbles) de l'utilisateur à partir de la mesure de la longueur des câbles, effectuée via les encodeurs optiques solidaires des moteurs. Soient $P(x, y, z)$ la position de la main de l'utilisateur et l_i la longueur du $i^{\text{ème}}$ ($i=0, \dots, 3$) câble. $P(x, y, z)$ doit satisfaire le système d'équations 4.1 :

$$\begin{cases} l_0^2 = (x + a)^2 + (y + a)^2 + (z + a)^2 \\ l_1^2 = (x - a)^2 + (y - a)^2 + (z + a)^2 \\ l_2^2 = (x - a)^2 + (y + a)^2 + (z - a)^2 \\ l_3^2 = (x + a)^2 + (y - a)^2 + (z - a)^2 \end{cases} \quad (4.1)$$

Si l'on considère que l'arête de l'espace de travail en position du système est 2a (**Figure 4.6**), la position $P(x, y, z)$ de la main de l'utilisateur en fonction de la longueur l_i de chaque câble, est donnée par le système d'équations 4.2 :

$$\begin{cases} x = \frac{(l_0^2 - l_1^2 - l_2^2 + l_3^2)}{8a} \\ y = \frac{(l_0^2 - l_1^2 + l_2^2 - l_3^2)}{8a} \\ z = \frac{(l_0^2 + l_1^2 - l_2^2 - l_3^2)}{8a} \end{cases} \quad (4.2)$$

Dans la pratique le système admet une certaine dérive dans la mesure de la position, impliquant des erreurs d'échelle et de translation. Ceci implique des imprécisions dans l'application des forces. Nous avons déterminé les erreurs absolues des mesures de position du système selon les trois directions x (profondeur), y (largeur) et z (hauteur). Les résultats sont présentés dans l'annexe B.

4.2.1.3 Application des forces

La force \vec{f} appliquée sur la main de l'utilisateur est la résultante des forces appliquées par chaque moteur. Soient \vec{u}_i vecteur unitaire et k_i la valeur de la tension du câble i ($i=0, 1, 2, 3$), la force appliquée est donnée par l'équation 4.3. La **figure 4.6** illustre une configuration main droite à 4 câbles.

$$\vec{f} = \sum_{i=0}^3 k_i \vec{u}_i, k_i > 0 \quad (4.3)$$

4.2.2 Systèmes de capture de mouvement

Le *SPIDAR* permet de mesurer la position d'une ou des deux mains de l'utilisateur dans un espace de travail relativement important. Toutefois, le système admet une certaine dérive. Celle-ci est illustrée sur la **figure B.1**. La viabilité de notre approche exige une précision en position de l'ordre de quelques millimètres (1-3 mm). Ainsi, différents systèmes de capture de mouvement ont été intégrés à

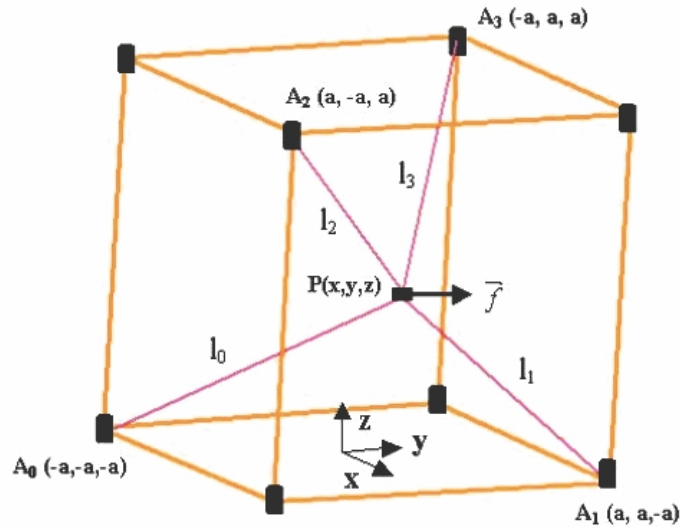


FIGURE 4.6 – Illustration d’une configuration main droite à 4 câbles. $P(x, y, z)$ représente la position de la main droite de l’utilisateur et l_i la longueur du $i^{\text{ème}}$ ($i=0, \dots, 3$) câble.

la plate-forme. Ces systèmes, décrits ci-après, permettent en outre de mesurer les degrés de liberté liés à l’orientation.

4.2.2.1 Capture par champs électromagnétiques

Nous avons dans un premier temps intégré à la plate-forme un système de capture de mouvement électromagnétique. Ce système, le PatriotTM [7], est composé d’une source électromagnétique à champ moyen et de deux capteurs. Leurs positions et leurs orientations sont calculées à partir de la mesure des champs électromagnétiques émis par la source. Nous avons déterminé les erreurs absolues de mesure de position du système, selon les trois directions x (profondeur), y (largeur) et z (hauteur). Les résultats sont présentés dans l’annexe B. La **figure B.2** représente l’erreur de position mesurée en fonction de la distance d’un capteur à la source électromagnétique, placée au centre de l’espace de travail de la plate-forme. Celle-ci est de l’ordre de 0.45 cm pour une distance mesurée de 30 cm. Pour une distance inférieure à 70 cm, l’erreur absolue est inférieure au centimètre. Au delà de 70 cm, l’erreur croît de manière importante pour atteindre une erreur de 2.11 cm pour une distance de 100cm.

4.2.2.2 Capture par caméras infrarouges

Dans un second temps, nous avons travaillé à l’intégration d’un autre système de capture de mouvement. Ce système, *Motion Captor RT* [157] est basé sur l’utilisation de plusieurs caméras infrarouges permettant de mesurer la posi-

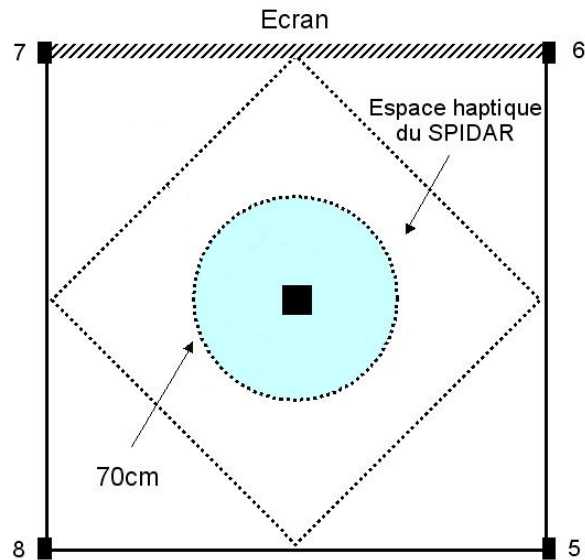


FIGURE 4.7 – Vue de dessus de l’espace de mesure du système électromagnétique, superposé à l’espace de travail du *SPIDAR*. Le carré noir représente la source électromagnétique. A partir de 70 cm l’erreur de mesure est supérieure à 1 cm.

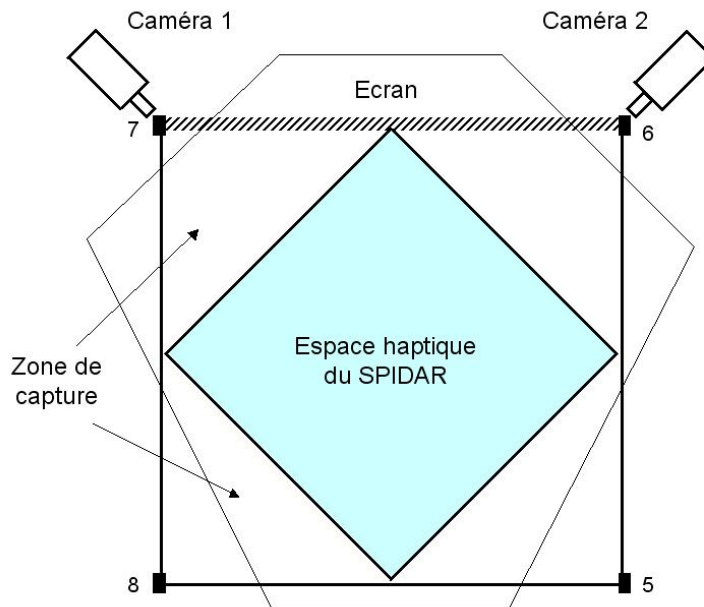


FIGURE 4.8 – Vue de dessus de l’espace de travail du système de capture par caméras infrarouges. Celles-ci sont placées de chaque côté de l’écran à une hauteur de 2.30 m environ.

tion de réflecteurs sphériques, placés sur le corps de l'utilisateur. La **figure 4.8** propose une vue de dessus de l'espace de travail du système. Dans notre cas, les mouvements sont effectués face à l'écran, ce qui justifie l'utilisation de deux caméras. On remarque que la zone de capture du système recouvre dans son intégralité l'espace de travail du *SPIDAR* et par conséquent l'espace haptique global du *SPIDAR*.

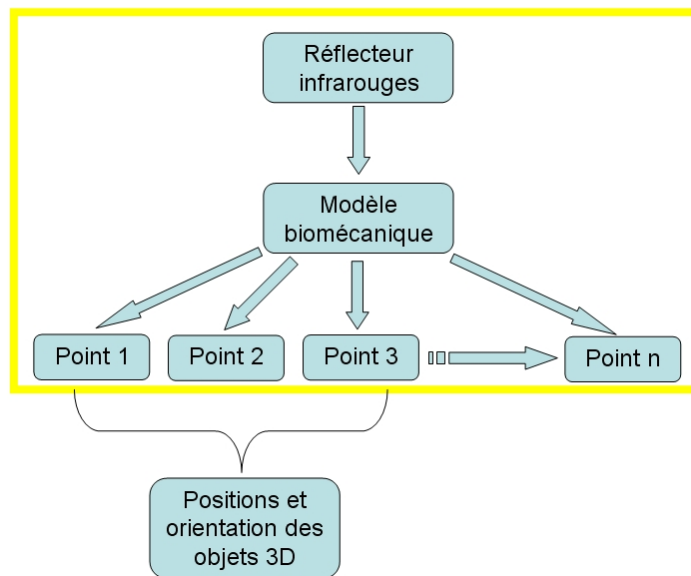


FIGURE 4.9 – Illustration des étapes relatives à l'intégration de l'utilisateur dans une application via le système de capture de mouvement infrarouge.

La **figure 4.9** illustre les étapes relatives à l'intégration de l'utilisateur via le système de capture de mouvement par caméras. La première étape consiste à reconnaître le modèle biomécanique à partir de la disposition des réflecteurs sur l'utilisateur. La seconde consiste à mesurer la position de chaque réflecteur dans l'espace de travail. La dernière étape consiste à calculer la position et l'orientation des éléments dont on souhaite mesurer la position et l'orientation dans l'espace de travail (mains, etc.). Dans le cadre de notre étude, ces mesures concernent le modèle biomécanique constitué d'un avant-bras et d'une main articulée que nous avons développé (**Figure 3.16**).

Après une phase de calibration (Annexe A), nous avons déterminé, comme pour les systèmes de capture de mouvement précédents, l'erreur de position du système selon les trois directions x (profondeur), y (largeur) et z (hauteur). Les résultats sont présentés dans l'annexe B. La **figure B.3** représente l'erreur mesurée, en fonction de la distance du trièdre permettant de connaître la position et l'orientation de la main par rapport au centre de l'espace de travail. L'erreur de position est de l'ordre de 1 mm pour une distance de 10 cm par rapport au centre de l'espace de travail, et d'environ 5 mm pour une distance de 100cm. Contrairement au système de capture par champs électromagnétiques, nous notons que l'erreur est très faible et qu'elle varie linéairement avec la distance. Ainsi,

ce système peut se substituer avantageusement au *SPIDAR* pour la mesure de la position. De plus, il prend en compte l'orientation.

4.2.3 Capture du mouvement des doigts

Lors de tâches nécessitant une certaine dextérité de la part de l'utilisateur, l'utilisation d'une interface gestuelle telle qu'un gant de données est impérative. Celui-ci permet de mesurer différents degrés de liberté de la main, afin de détecter certaines configurations gestuelles et/ou d'animer une main virtuelle. Nous avons utilisé un gant de données de type *5DT Data Glove 14 ddl*. Ce gant, illustré à la **figure 4.10**, est doté de quatorze capteurs (fibres optiques), disposés sur le dessus des doigts. Afin de mesurer la flexion des phalanges proximales et médianes, deux fibres optiques sont utilisées pour chaque doigt. La flexion de la phalange distale est calculée à partir de la valeur de la flexion de la phalange médiane. Pour la mesure des articulations (abduction/adduction) du pouce, deux capteurs sont utilisés. Pour la mesure de l'abduction/adduction des autres doigts, trois capteurs supplémentaires sont utilisés. Ce gant fonctionne à une fréquence minimale de 75 Hz et il transmet les informations à la station de travail à une vitesse de 115200 bauds.



FIGURE 4.10 – Illustration du gant de données *5DT Data Glove 14 ddl*.

4.2.4 Stimulations vibro-tactiles

Afin de proposer à l'opérateur un retour sensoriel correspondant aux caractéristiques d'entrée (14 ddl) du gant décrit ci-dessus, nous avons développé une batterie de stimulateurs tactiles basés sur l'utilisation de vibro-moteurs de petite dimension. Ces moteurs ont une tension nominale de 1.5 V et une consommation maximale de 130 mA à 10000 tr/mn. Leur diamètre est d'environ 5 mm, pour une longueur de 20 mm. Ils communiquent avec une interface de commande reliée au port USB de la station de travail. Dans une première version, les moteurs étaient reliés à l'interface de commande par des fils. Par la suite, nous avons piloté les



FIGURE 4.11 – Gant à retour vibro-tactile développé au LISA : (a) placement des moteurs sur le *5DT Data Glove 14* ddl et (b) utilisateur en situation de test de perception.

vibro-moteurs via un protocole de communication sans fils (ZigBee). La **figure 4.11 (a)** montre un placement possible de cinq moteurs sur le *5DT Data Glove 14* ddl. La **figure 4.11 (b)** montre un utilisateur en situation de test. Le système développé permet de piloter jusqu'à 10 moteurs simultanément. L'amplitude de la force appliquée par les vibro-moteurs est donnée par équation 4.4. Ainsi, pour un vibro-moteur dont le rotor a une masse $m = 0.5g$, un rayon $r = 2\text{ mm}$, tournant à une vitesse angulaire de 10000 tours par minute (équivalent à $\omega = 1047\text{ s}^{-1}$), l'amplitude est de $1.1N$ (2.2 N crête à crête). Notons que cette force varie de façon sinusoïdale au cours du temps.

$$F = m.r.\omega^2 \quad (4.4)$$

4.3 Interaction avec un prototype de boîtier

La simulation étudiée dans cette section est basée sur une maquette numérique de phare fournie par Valeo Lighting Systems (Angers) et ayant subi l'ensemble du processus d'intégration décrit au chapitre précédent. Cette simulation permet à un utilisateur de sélectionner et de déplacer différentes lampes, pour les insérer dans un boîtier de phare. Les collisions sont gérées par le moteur *NovodeXTM* et signalées par des retours visuel, sonore ou vibro-tactile. L'influence de ces différents retours sensoriels sur la performance de l'utilisateur sera étudiée dans le chapitre suivant.

4.3.1 Objectif

Notre objectif est double. Il s'agit d'une part (1) d'étudier l'adéquation de la plate-forme à la simulation proposée et (2) d'analyser l'évolution de la fréquence de rafraîchissement des images et en particulier l'impact de la surcharge

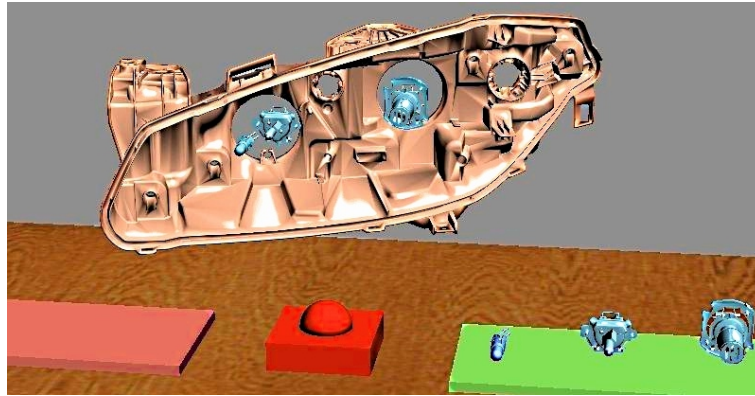


FIGURE 4.12 – Vue rapprochée de l’environnement de manipulation. Trois lampes sont placées dans le boîtier et trois autres lampes sont placées sur la table.

de calcul engendrée par les collisions et les retours sensoriels associés. Cette validation repose sur une procédure impliquant une interaction temps-réel échelle 1 : 1 avec l’environnement proposé. La fluidité de la simulation dépend de la fréquence de rafraîchissement des images. Celle-ci a donc une influence importante sur la perception et le contrôle de mouvements en environnement virtuel (mouvements d’objets, mouvements de segments corporels et déplacement du corps dans l’espace). En outre, une fréquence de rafraîchissement trop faible peut engendrer des conflits vestibulo-oculaires.

4.3.2 Environnement de manipulation

L’environnement de manipulation, illustré à la **figure 4.12**, est constitué de 11 éléments possédant des caractéristiques différentes en "poids" et en nombre de polygones . La **figure 4.13** présente les caractéristiques de chaque élément de l’environnement de manipulation Celui-ci est constitué de 124399 polygones et a un "poids" de 2,38 Mo. Il comporte en particulier un boîtier de phare, trois lampes de tailles différentes placées à l’intérieur de celui-ci, et trois autres lampes placées sur une table. Cet environnement sera utilisé dans le chapitre suivant pour évaluer l’influence de différents retours sensoriels sur la performance humaine.

4.3.3 Architecture du système

La **figure 4.14** illustre l’architecture du système. Celle-ci repose sur une station de travail unique et utilise les périphériques et interfaces suivants :

- le *SPIDAR* pour la capture de mouvement en position,
- le gant vibro-tactile illustré à la **figure 4.11 (a)**,
- un système audio 5.1.

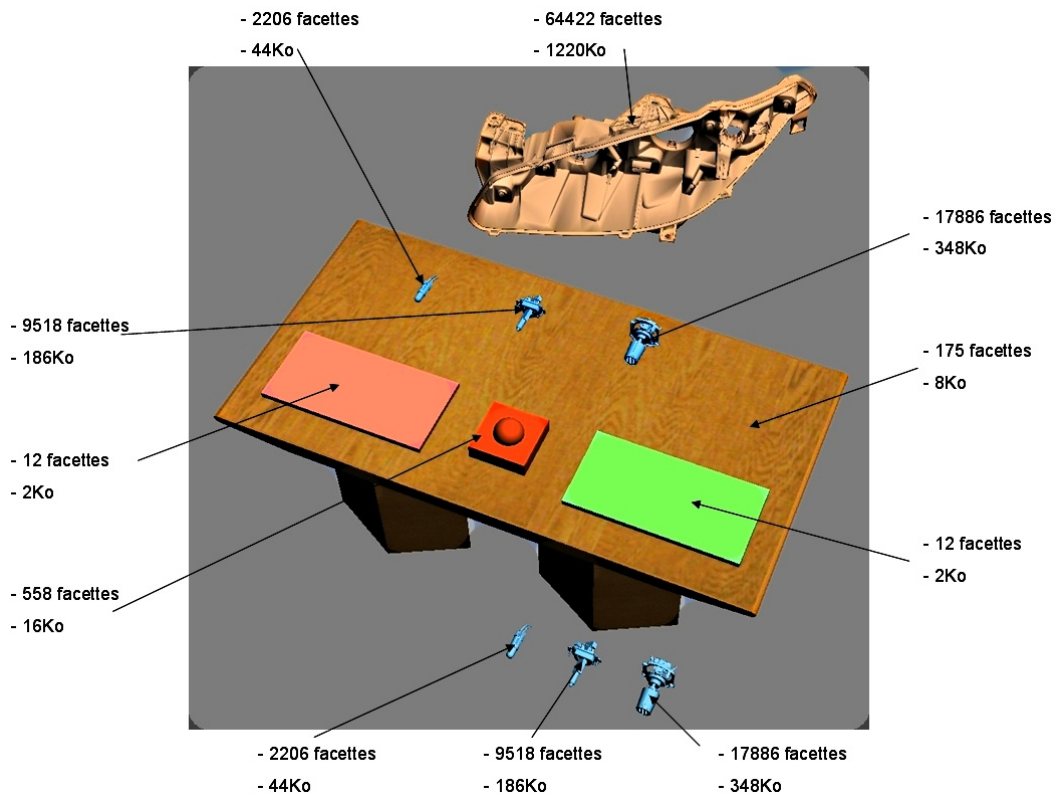


FIGURE 4.13 – Caractéristiques ("poids" et nombre de polygones) de chaque pièce de l'environnement de manipulation.

4.3.4 Procédure d'interaction

Nous avons demandé à un utilisateur (1) de déplacer le curseur 3D (sphère) à l'aide du *SPIDAR* et du gant à retour vibro-tactile, (2) de sélectionner la plus grosse lampe et de la déplacer en direction du boîtier, puis (3) d'entrer en collision avec celui-ci. Une collision devait avoir lieu toutes les 10 secondes, pendant 60 secondes. Cette procédure a été répétée 3 fois de suite pour chacun des deux modes de visualisation (monoscopique et stéréoscopique), et avec un retour sensoriel différent : un retour visuel (changement de couleur du boîtier), un retour sonore (activation d'un fichier son), et un retour vibro-tactile sur l'extrémité des doigts de l'utilisateur.

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre précédent, le moteur physique renvoie des informations sur l'état des collisions entre les objets de l'environnement. Le premier état (*Start.touch*) indique l'initialisation du contact entre la lampe manipulée par l'opérateur et le boîtier. Le second état (*On.touch*) est activé lors de l'interpénétration de ces deux objets. Enfin, le dernier état (*End.touch*) indique la fin de l'interpénétration entre les objets.

Les retours sensoriels étaient activés quand l'état était *Start.touch*, et désactivés quand celui-ci était *End.touch*. On distingue deux états du gant vibro-tactile : main ouverte ou main fermée. Pour déplacer une lampe dans l'environnement virtuel, il faut que le curseur 3D (sphère) soit en contact avec celle-ci et que la

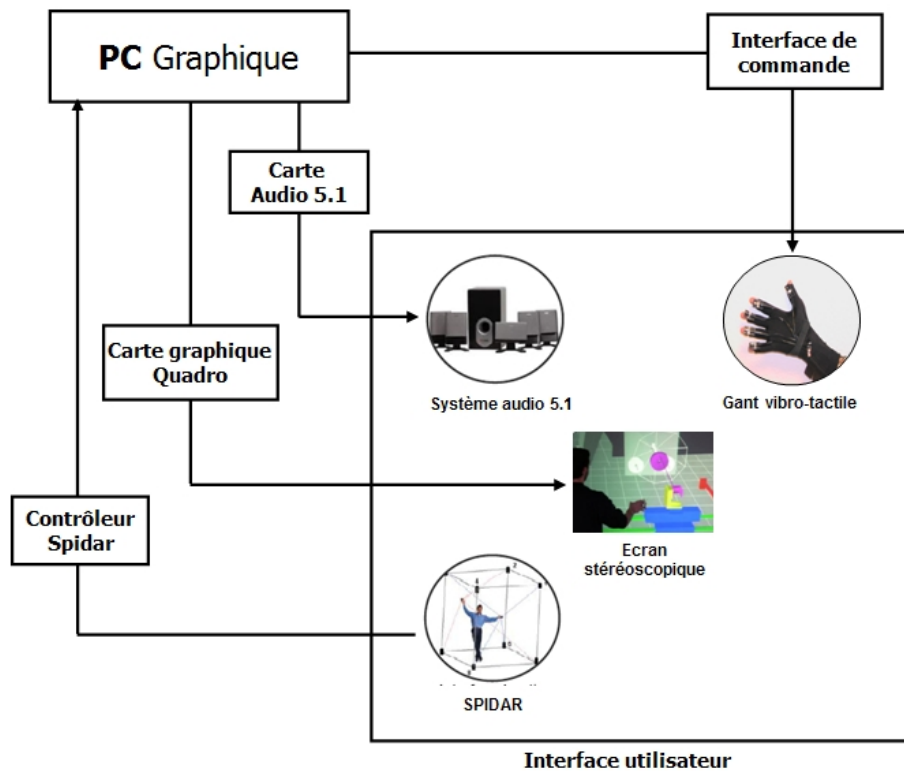


FIGURE 4.14 – Illustration de l'architecture du système.

main soit fermée. Pour relâcher une lampe, il suffit d'ouvrir la main.

4.3.5 Performance et bilan

Nous avons analysé l'influence cumulée de (i) la surcharge de calcul et (ii) des retours sensoriels sur la fréquence de rafraîchissement des images lors des collisions répétées avec le boîtier. Les résultats sont présentés à l'annexe C. Nous avons observé que la fréquence de rafraîchissement en l'absence de collision était en moyenne d'environ 67.4 images par seconde (Ips) en mode monoscopique, et d'environ 57.7 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une diminution de la fréquence qui pouvait atteindre 5.35 Ips en mode monoscopique et 4.67 Ips en mode stéréoscopique, quel que soit le retour sensoriel. L'impact de la surcharge de calcul engendrée par les collisions sur l'évolution de la fréquence de rafraîchissement est relativement faible et n'a donc pas d'effet sur la fluidité de la simulation. Il semble que l'activation des différents retours sensoriels ait un effet négligeable. Concernant l'utilisabilité de la plate-forme, l'utilisateur n'a pas rencontré de difficulté lors de la sélection et du déplacement de la lampe vers le boîtier et lors des collisions successives. Cependant, il a évoqué des problèmes de perception de profondeur en vision monoscopique.

4.4 Interaction avec une maquette complexe

La simulation étudiée dans cette partie est basée sur l'interaction avec une maquette virtuelle complexe de relativement grande dimension, ayant subi l'ensemble du processus d'intégration proposé. L'utilisateur déplace, cette fois-ci, une main virtuelle (non animée) via le *SPIDAR* pour atteindre différentes parties de la maquette. Comme dans la simulation précédente, les collisions sont gérées par le moteur *NovodeXTM* et signalées par des retours visuel, sonore et vibrotactile. L'influence de ces retours sensoriels sur la performance de l'utilisateur sera étudiée dans le chapitre suivant.

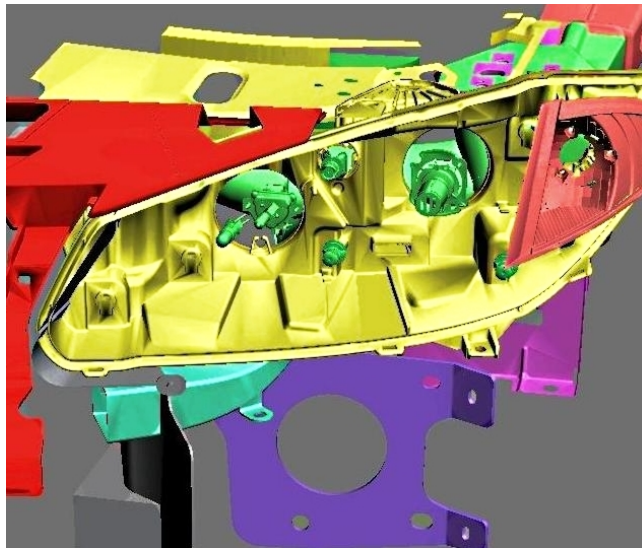


FIGURE 4.15 – Maquette virtuelle utilisée pour la simulation.

4.4.1 Objectif

L'objectif de cette simulation est identique au précédent, à savoir (1) étudier l'adéquation de la plate-forme à la simulation proposée, et (2) analyser l'impact de la surcharge de calcul engendrée par les collisions et les retours sensoriels associés sur la fréquence de rafraîchissement. L'architecture du système reste inchangée (**Figure 4.14**).

4.4.2 Maquette virtuelle

La maquette virtuelle, illustrée à la **figure 4.15**, représente un boîtier de phare et divers éléments fixes de son environnement. Elle est constituée de 268264 polygones et a un "poids" de 5,24 Mo. Le nombre de polygones a ainsi été multiplié par un facteur deux, par rapport l'environnement précédent. Cette maquette est constituée de différents éléments possédant chacun des caractéristiques différentes en terme de "poids" et nombre de polygones (**Figure 4.16**).

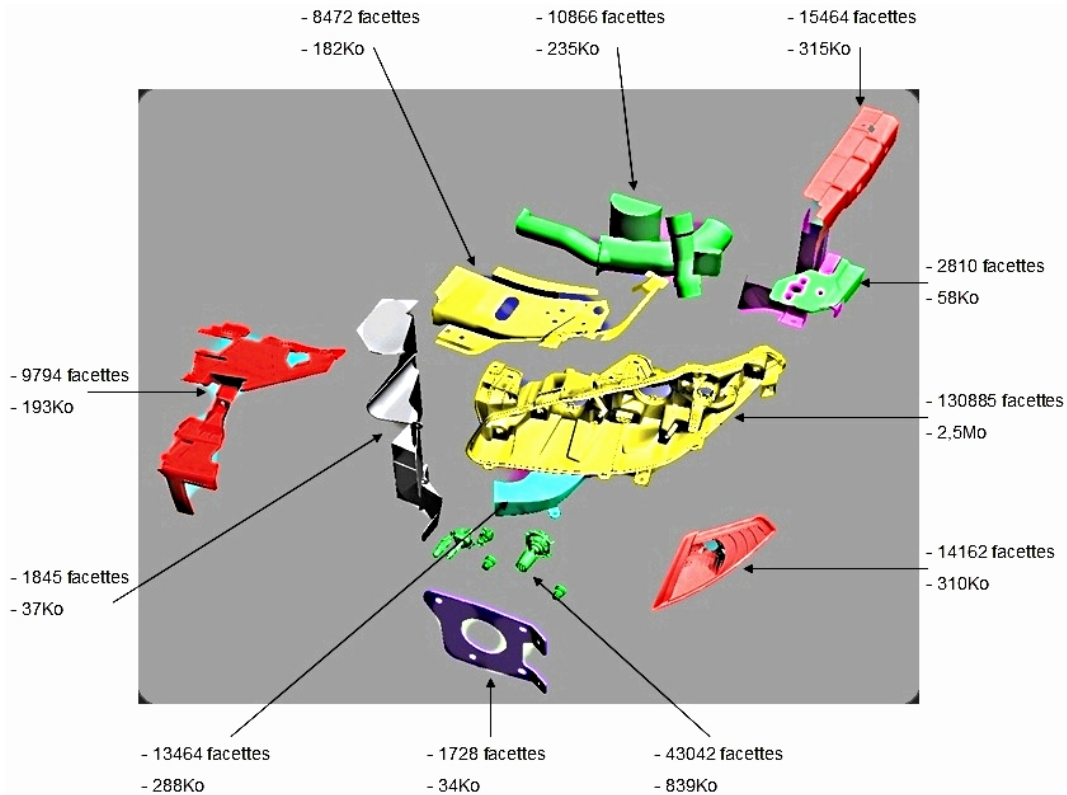


FIGURE 4.16 – Caractéristiques ("poids" et nombre de polygones) des différents éléments de la maquette virtuelle.

4.4.3 Procédure d'interaction

Nous avons demandé à un utilisateur novice en RV, de déplacer la main virtuelle en direction du prototype, et d'entrer en collision avec celui-ci toutes les 10 secondes, pendant 60 secondes (**Figure 4.17**). Cette procédure a été répétée 3 fois de suite pour chacun des deux modes de visualisation (monoscopique et stéréoscopique), et avec un retour sensoriel différent : un retour visuel (changement de couleur de la main), un retour sonore (activation d'un fichier son), et un retour vibro-tactile sur l'extrémité des doigts de l'utilisateur. Comme précédemment, les retours sensoriels ont été activés quand l'état des collisions était *On.touch* et ont été désactivés quand cet état était *End.touch*.

4.4.4 Performance et bilan

Comme précédemment, nous avons analysé l'influence cumulée de la surcharge de calcul et des retours sensoriels associés aux collisions avec une maquette virtuelle complexe, sur la fréquence de rafraîchissement des images. Les résultats sont présentés à l'annexe C. Nous avons observé que cette fréquence, en l'absence de collision, était en moyenne de 57.6 Ips en mode monoscopique et de 47.6 Ips en mode stéréoscopique. Nous avons également observé une diminution

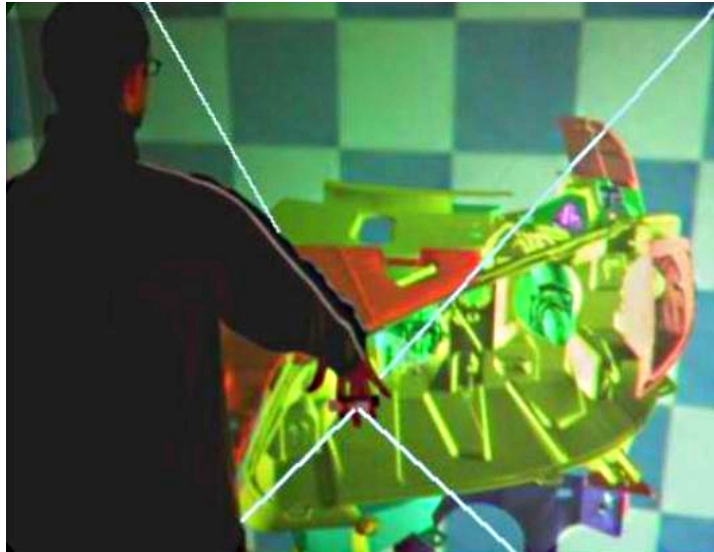


FIGURE 4.17 – Tests de collision avec la maquette virtuelle.

de la fréquence de rafraîchissement lors des collisions successives. Celle-ci peut atteindre 5.61 Ips en mode monoscopique et 5.63 Ips en mode stéréoscopique. Les résultats ont montré que l'impact de la surcharge de calcul engendrée par les collisions sur l'évolution de la fréquence de rafraîchissement des images était relativement faible, bien que l'environnement utilisé soit deux fois plus complexe que le précédent. Concernant l'utilisabilité de la plate-forme, aucune difficulté n'est à signaler. Il est toutefois à noter que l'utilisateur a également évoqué un problème de perception de profondeur en vision monoscopique.

4.5 Interaction en environnement moteur

La simulation étudiée dans cette partie implique un environnement moteur complet. Le prototype virtuel de cet environnement a été intégré dans une application permettant à l'utilisateur de simuler à l'échelle 1:1, l'extraction d'une lampe placée dans un boîtier. L'utilisateur est représenté par un avatar tronqué constitué d'un avant-bras et d'une main qu'il peut animer en temps-réel via le gant de données *5DT Data Glove 14 ddl*. Ses mouvements sont mesurés par le système de capture par caméras infrarouges. Les collisions entre l'avatar et le prototype virtuel sont également gérées par le moteur *NovodeXTM* et signalées par un retour visuel ou un retour d'effort. L'influence de ces retours sensoriels sur la performance de l'utilisateur sera également étudiée dans le chapitre suivant, avec le même environnement moteur.

4.5.1 Objectif

L'objectif visé ici est identique à celui des deux précédentes simulations, à savoir (1) étudier l'adéquation de la plate-forme à la simulation proposée, et (2)

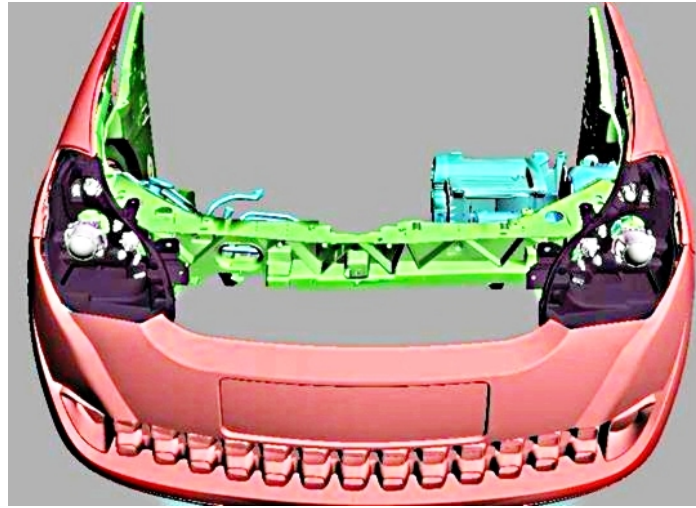


FIGURE 4.18 – Prototype virtuel de l'environnement moteur.

analyser l'impact de la surcharge de calcul engendrée par les collisions et les retours sensoriels associés, sur la fréquence de rafraîchissement. Cette troisième simulation implique (i) un prototype plus complexe, (ii) l'utilisation d'un modèle biomécanique humain, et (iii) un paradigme d'interaction beaucoup plus évolué.

4.5.2 Prototype virtuel

Le prototype virtuel, illustré à la **figure 4.18**, représente un boîtier de phare et son environnement moteur complet. Il est constitué de 1300000 polygones et a un "poids" de 25 Mo. Le nombre de polygones, par rapport à la maquette virtuelle précédente, a donc été multiplié par un facteur 5. Ce prototype virtuel est constitué de différentes parties possédant chacune des caractéristiques différentes en termes de "poids" et nombre de polygones (**Figure 4.19**).

4.5.3 Architecture du système

Cette simulation repose également sur une station de travail unique et les périphériques et interfaces suivants :

- le *SPIDAR* pour le retour d'effort,
- le gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* pour l'animation des doigts,
- le système de capture de mouvement par caméras infrarouges pour animer l'avatar,

La **figure 4.20** illustre l'architecture du système et les interfaces utilisées.

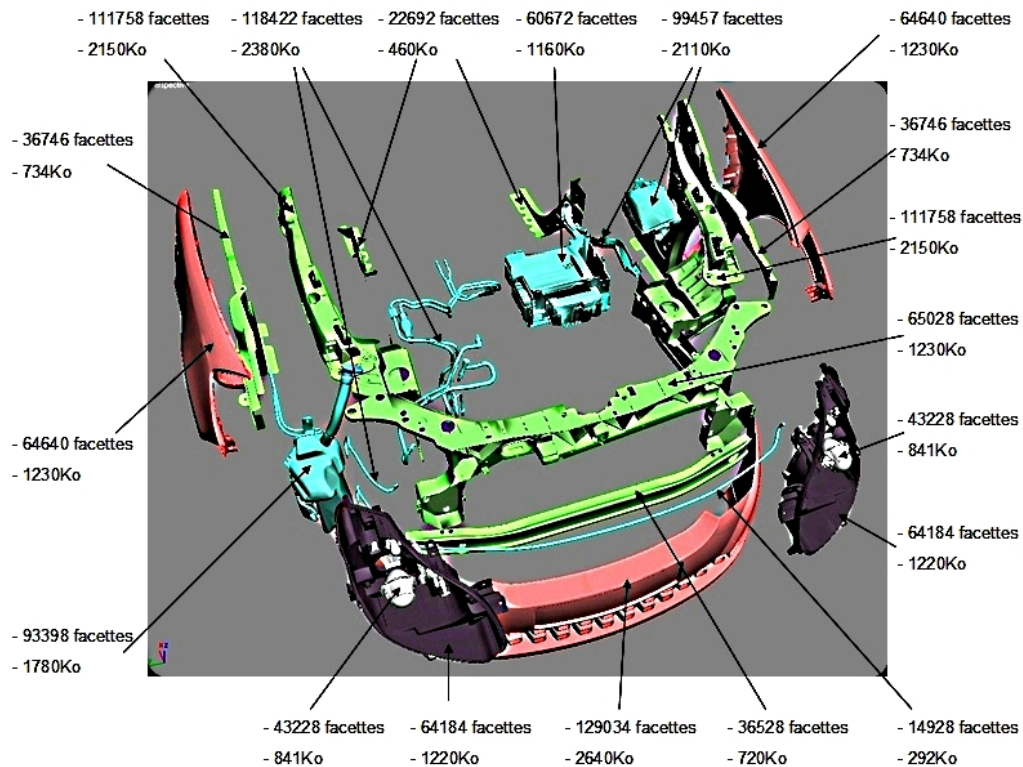


FIGURE 4.19 – Caractéristiques ("poids" et nombre de polygones) de chaque partie du prototype virtuel.

4.5.4 Procédure d'interaction

Nous avons demandé à un utilisateur novice en RV, d'extraire une lampe du prototype virtuel puis de la faire entrer en collision avec celui-ci toutes les 10 secondes, pendant 60 secondes. Cette procédure a été répétée trois fois de suite pour chacun des deux modes de visualisation (monoscopique et stéréoscopique), et avec un retour visuel (changement de couleur de l'avatar) ou un retour d'effort. Nous avons utilisé les mêmes états de collisions que précédemment pour l'activation et la désactivation des retours sensoriels.

4.5.5 Performance et bilan

Dans cette simulation, nous avons analysé l'influence cumulée de la surcharge de calcul et des retours sensoriels associés aux collisions avec un prototype virtuel complexe, sur la fréquence de rafraîchissement des images. Les résultats sont présentés à l'annexe C. Nous avons observé qu'en absence de collision, cette fréquence était en moyenne de 42.7 Ips en mode monoscopique et de 32.6 Ips en mode stéréoscopique. Nous avons ainsi observé une diminution de la fréquence de rafraîchissement d'environ 5.68 Ips en mode monoscopique et 5.6 Ips en mode stéréoscopique.

Les résultats montrent donc que l'impact de la surcharge de calcul engendrée

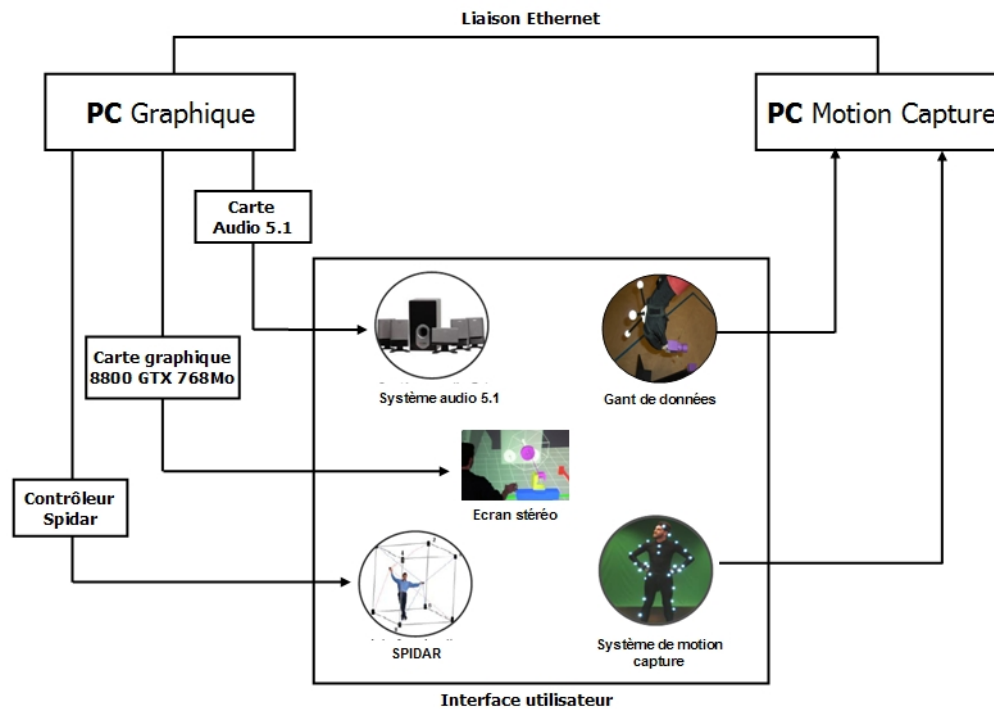


FIGURE 4.20 – Architecture du système et interfaces utilisés pour l’interaction avec le prototype virtuel complexe.

par les collisions et les retours sensoriels associés était relativement faible, malgré l’utilisation d’un prototype virtuel complexe. Concernant l’utilisabilité de la plate-forme, différentes limites ont été signalées par l’utilisateur. La première est liée à la perception de profondeur en vision monoscopique, en effet, celui-ci a eu des difficultés pour accéder à la lampe. La seconde difficulté concerne le réalisme du retour d’effort. L’utilisateur a mentionné que l’amplitude de la force de contact lui paraissait trop importante.

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la plate-forme de réalité virtuelle utilisée dans le cadre de notre étude. Puis, nous avons validé la méthodologie de traitement des maquettes numériques présentée au chapitre précédent. Cette validation a été réalisée à travers différentes simulations permettant d’analyser l’utilisabilité de la plate-forme dans différents types de tâches (accessibilité, manipulation et extraction de pièces mécaniques). Nous avons en particulier mesuré l’influence de la surcharge de calcul engendrée par les collisions et les retours sensoriels associés, sur la fréquence de rafraîchissement des images. Nous avons observé que celle-ci était principalement affectée par la surcharge de calculs liés aux collisions gérées par le moteur physique. En effet, quelle que soit le retour sensoriel et le nombre de polygones, les chutes de la fréquence de rafraîchissement étaient en moyenne

de 5 Ips. Notre étude a également permis d'identifier les limites de l'approche proposée pour le traitement des maquettes issues de la CAO. Celle-ci a permis de simuler différentes tâches impliquant des maquettes et prototypes virtuels physicalisés possédant jusqu'à 10^6 polygones.

Dans le chapitre suivant, nous comparons, à travers une série cohérente d'expérimentations, la pertinence et l'influence de différents retours sensoriels lors de tâches impliquant l'accessibilité, l'extraction et le remplacement de lampes sur prototypes virtuels complexes.

Chapitre 5

Evaluation et comparaison de retours sensoriels

5.1 Introduction

L'intégration de prototypes virtuels dans un environnement virtuel (EV) permet de simuler à l'échelle et de valider différentes tâches. Cette validation nécessite une configuration adéquate, basée sur des interfaces et périphériques d'interaction permettant à l'utilisateur d'interagir de manière naturelle et efficace avec les prototypes. Dans ce contexte, nous sommes confrontés à deux problèmes interdépendants. Le premier est relatif à l'identification des besoins informationnels de l'utilisateur pendant l'exécution de la tâche, et le second, au canal sensoriel utilisé. Deux types de besoins informationnels doivent alors être distingués : les besoins liés à la *perception de l'environnement* dans lequel la tâche est réalisée, et les besoins liés à la *perception des actions* que l'utilisateur effectue dans cet environnement (retours sensoriels). Dans le premier chapitre, nous avons cité quelques travaux portant sur l'étude de la performance humaine lors de tâches impliquant des retours haptique, visuel ou auditif. La plupart de ces travaux sont basés sur des environnements relativement simples.

Dans ce chapitre nous comparons, à travers une série cohérente d'expérimentations, la pertinence et l'influence de différents retours sensoriels lors de tâches impliquant l'accessibilité, l'extraction et le remplacement de lampes sur prototypes virtuels complexes. Notre approche repose sur la mise en oeuvre de paradigmes expérimentaux basés sur la multimodalité et la substitution sensorielle [127].

5.2 Test préliminaire d'accessibilité[131]

L'accessibilité à certaines parties d'une maquette ou d'un prototype virtuel peut poser des difficultés dues à leur éloignement, à l'encombrement de l'environnement de travail ou à un manque de visibilité. En effet, certaines pièces peuvent être inaccessibles ou masquées par d'autres. On peut alors utiliser des interfaces haptiques, qui permettent d'effectuer la tâche en absence de retour visuel. Cette

approche réduit les possibilités d'action et l'espace de travail de l'utilisateur. En outre, des problèmes de coût, d'intrusivité et de sécurité peuvent se poser. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, une approche basée sur l'utilisation de la substitution sensorielle (restitution d'efforts via les canaux visuels, sonore ou tactile), est intéressante et a été envisagée dans nos simulations.

5.2.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est multiple. Il s'agit (1) d'étudier la pertinence et l'influence d'un retour vibro-tactile sur le temps d'accessibilité à différentes parties de la maquette virtuelle, et (2) de comparer les performances obtenues avec ce retour sensoriel et celles obtenues avec un retour visuel ou sonore. L'hypothèse que nous soutenons est qu'un retour de type vibro-tactile permet de renvoyer à l'opérateur une information pertinente et suffisante pour la perception des collisions avec la maquette. Nous faisons aussi l'hypothèse qu'une restitution visuelle ou sonore des collisions conduit à une performance similaire. Ces hypothèses sont basées sur l'état de l'art, réalisé dans le premier chapitre.

5.2.2 Tâche

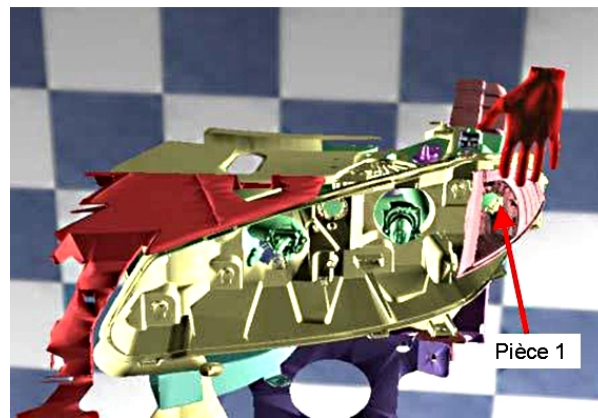
La tâche, illustrée à la **figure 5.1**, consistait à accéder et à entrer en collision avec différentes pièces de la maquette virtuelle. Une des pièces impliquées dans cette tâche est partiellement cachée. L'opérateur interagit à échelle 1:1 avec la maquette virtuelle. Celle-ci a donc les mêmes dimensions que dans la pièce réelle, à savoir une hauteur d'environ 40 cm, une largeur d'environ 50 cm et une profondeur d'environ 80 cm. L'utilisateur n'a ainsi pas besoin de se déplacer dans l'espace de travail pour atteindre l'ensemble des pièces.

5.2.3 Protocole

Cinq sujets volontaires, tous droitiers, ont participé à cette expérience. Ces sujets avaient une vision normale ou corrigée. Chacun d'entre eux devait effectuer la tâche 5 fois successivement avec un temps de repos de 20 s entre chaque essai, dans les quatre conditions C_1 , C_2 , C_3 et C_4 suivantes :

- C_1 : aucun retour sensoriel,
- C_2 : un retour sonore,
- C_3 : un retour visuel (changement de couleur de la main virtuelle),
- C_4 : un retour vibro-tactile.

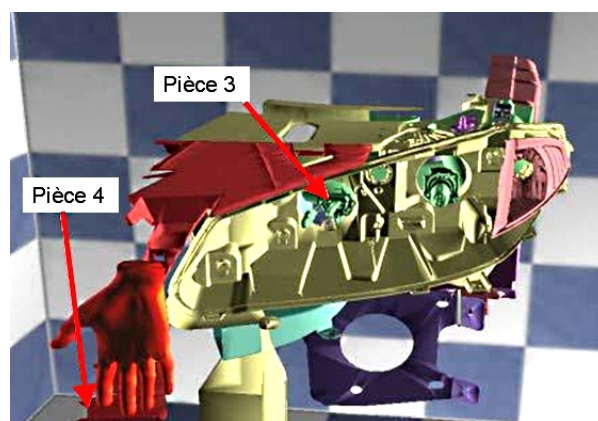
Afin qu'ils puissent s'appropriier le système, les sujets ont réalisé la tâche dans la condition C_1 , avant de commencer les passations. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé afin d'éviter un biais dû au transfert d'apprentissage. Les stimulations tactiles ont été appliquées via le gant à retour tactile décrit au chapitre précédent. Le temps de réalisation de la tâche a été enregistré à la fin de



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.1 – Illustration de la tâche d'accessibilité : (a) pièce 1, (b) pièce 2 et (c) pièces 3 et 4.

chaque essai. Le *SPIDAR* a été utilisé, uniquement dans cette première expérimentation, comme capteur de mouvement. La fréquence de rafraîchissement des images était supérieure à 30 Ips.

Afin de renforcer la perception visuelle de la maquette et de son environnement, une visualisation stéréoscopique a été utilisée. Les sujets portaient donc des lunettes polarisées et étaient placés face à l'écran de la plate-forme, au centre de l'espace de travail. Ils pouvaient bouger à l'intérieur de cet espace mais leur point de vue sur l'environnement virtuel n'était pas asservi aux mouvements de tête. Afin de recueillir des données subjectives (avis et préférences), un questionnaire a été soumis à chaque sujet à la fin de l'expérience.

5.2.4 Résultats

Dans une première partie, nous examinons les données relatives au temps d'exécution de la tâche. Dans la seconde, nous traitons les aspects subjectifs de la performance (informations recueillies via le questionnaire). Nous faisons également état des informations notées pendant l'expérience (difficultés rencontrées, stratégies adoptées, comportement des sujets, etc.).

5.2.4.1 Temps de réalisation

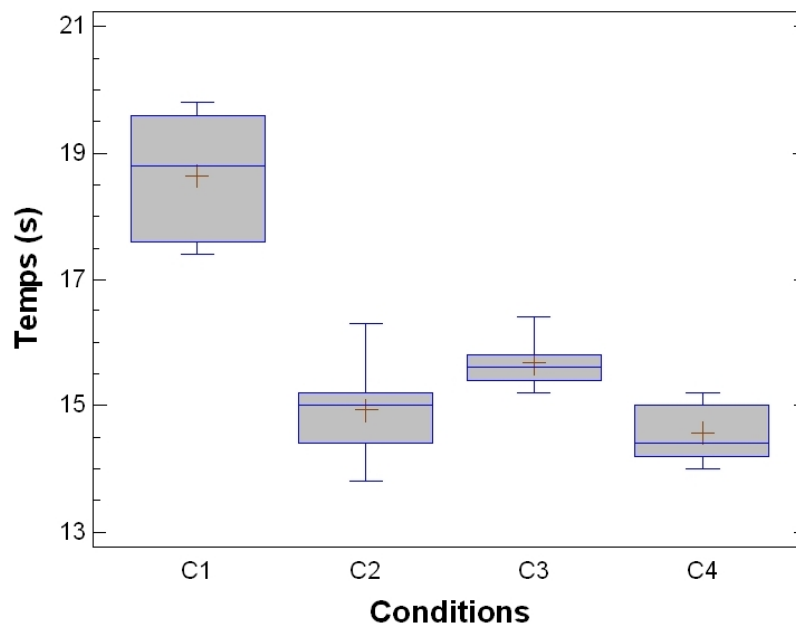


FIGURE 5.2 – Temps de réalisation de la tâche d'accessibilité pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour sonore, (C_3) avec retour visuel et (C_4) avec retour vibro-tactile.

Les données enregistrées (temps de réalisation) ont été traitées à travers une analyse de variance (ANOVA). Les résultats, illustrés à la **figure 5.2**, indiquent

un effet significatif des retours sensoriels sur le temps d'exécution de la tâche ($F(3, 4) = 7.88; p < 0.05$). Une différence significative a été mise en évidence entre le temps obtenu en absence de retour sensoriel et les temps obtenus avec les retours sonore, visuel, et vibro-tactile. En effet, en absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche était de 18,64s (std = 1.11). En présence des retours sonore, visuel, et vibro-tactile, le temps d'exécution est respectivement de 14,94s (std = 0.94), 15.68 s (std = 0.46) et 14.56s (std = 0.52). L'analyse de variance nous indique que la différence entre les trois retours sensoriels testés n'est pas significative. Nos hypothèses sur la pertinence du retour vibro-tactile et l'efficacité des retours sonore et visuel sont donc validées pour ce type de tâche.

5.2.4.2 Apprentissage

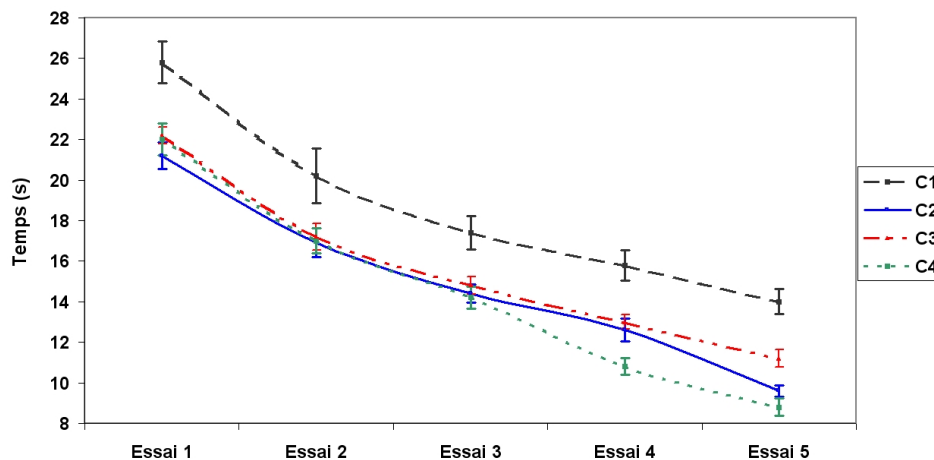


FIGURE 5.3 – Evolution du temps d'exécution de la tâche d'accessibilité pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour sonore, (C_3) avec retour visuel et (C_4) avec retour vibro-tactile.

Les valeurs moyennes et écart-types des indicateurs ne permettent pas une analyse fine de la performance. Ainsi, des évolutions positives et négatives de la performance peuvent donner lieu à des résultats moyens identiques. C'est pourquoi, une analyse systématique de l'évolution de la performance est nécessaire. Le processus d'apprentissage lié à la tâche d'accessibilité est illustré à la **figure 5.3**. On observe qu'en absence de retour sensoriel le temps moyen a été de 25.8s (std = 2.05) au premier essai et 14s (std = 1.22) au dernier. En présence d'un retour visuel, sonore et vibro-tactile, les temps moyens ont été respectivement de 21.2s (std = 1.30), de 22.2s (std = 0.84) et de 22s (std = 1.6) au premier essai et de 9.6s (std = 0.55), de 11.2 s (std = 0.84) et de 8.8s (std = 0.84) au dernier. Ces résultats montrent une amélioration de la performance de 50.9%, 54.7%, 49.5% et 60% pour les conditions C_1 , C_2 , C_3 et C_4 respectivement. On remarque que le retour sensoriel, quel qu'il soit, n'a pas d'influence sur le processus d'apprentissage, qui semble plus lié à la mémoire proprioceptive (mouvement de l'opérateur dans

l'espace).

5.2.4.3 Aspects subjectifs

L'observation des sujets, réalisée au cours de l'expérience, a révélé que ceux-ci n'avaient aucune difficulté pour atteindre les différentes parties de la maquette virtuelle. Cependant, en ce qui concerne l'accessibilité à la partie partiellement cachée, la plupart des sujets ont eu quelques difficultés dans la condition C_1 (absence de retour sensoriel) et dans la condition C_2 (retour visuel). Le retour tactile a été préféré aux retours visuel et sonore car il fournit une sensation de contact plus réaliste. Certains sujets ont indiqué que le retour sonore, bien qu'il ne donne pas d'information haptique concernant la collision, peut se substituer de manière efficace au retour tactile. Les sujets ont évoqué l'imprécision du système (*SPIDAR*) dans la retranscription des mouvements.

5.3 Tâche préliminaire de maintenance[131]

L'intégration d'un prototype virtuel dans un environnement échelle 1:1 permet de tester l'accessibilité de certaines pièces, mais aussi d'étudier et de valider différentes procédures d'assemblage et de maintenance. Dans ce contexte, il est impératif de proposer à l'opérateur des retours d'information lui permettant d'effectuer la tâche de manière naturelle et efficace.

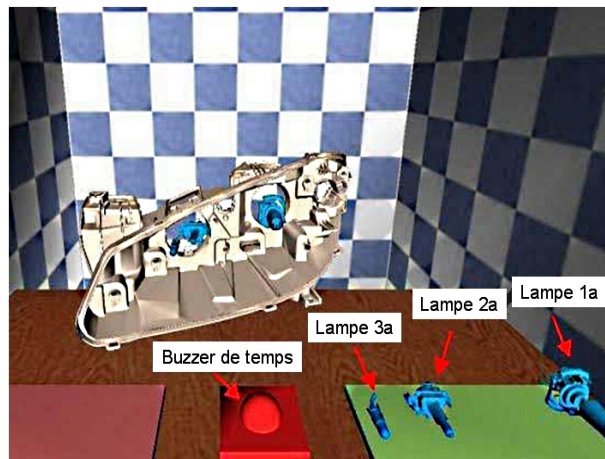
5.3.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est d'étudier l'influence de retours visuel et sonore sur la performance moyenne et le processus d'apprentissage lors d'une tâche de remplacement d'un jeu de lampes dans un boîtier de phare. Notre hypothèse est qu'une assistance perceptuelle est nécessaire à l'utilisateur pour effectuer la tâche de manière efficace.

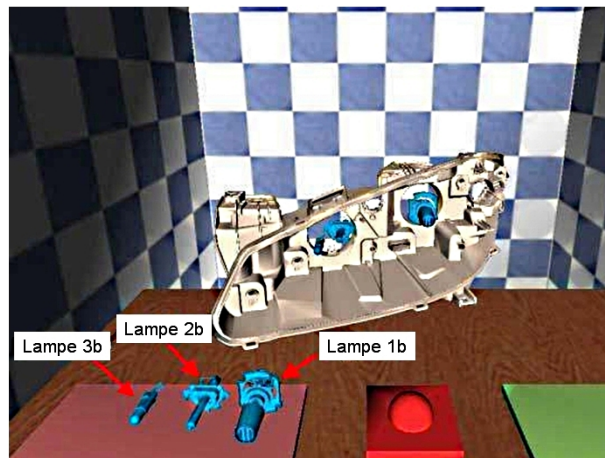
5.3.2 Tâche

La tâche consistait à remplacer un jeu de trois lampes, placées à l'intérieur d'un boîtier de phare. Un écart maximum (tolérance) de 2 cm, centré sur la position désirée des lampes, a été défini. Différents retours d'informations (visuel et sonore) permettant à l'opérateur de positionner les lampes avec précision sont proposés. Les lampes usagées et les lampes neuves devaient être respectivement extraites et placées dans le boîtier par l'arrière, de la gauche vers la droite. Les états initial et final de la tâche sont illustrés à la **figure 5.4(a)** et la **figure 5.4(b)** respectivement. Au départ, les lampes usagées se trouvent dans le boîtier.

Les lampes neuves ont été placées sur un tapis situé sur la table. Les lampes devaient être sélectionnées et manipulées par l'utilisateur à l'aide d'un curseur 3D.



(a)



(b)

FIGURE 5.4 – Illustration de l'état initial (a) et final (b) de la tâche de maintenance.

Seule leur position pouvait être modifiée. Bien qu'une prise en compte de l'orientation eut été possible via une configuration judicieuse des câbles du *SPIDAR*, des retours sensoriels permettant le contrôle simultané des 6 ddl impliqués (position et orientation) aurait été trop complexe à gérer pour l'utilisateur (surcharge cognitive).

5.3.3 Protocole

Dix-huit sujets volontaires ont participé à cette expérience. Ces sujets avaient tous une vision normale ou corrigée. Chacun d'entre eux devait réaliser la tâche définie précédemment dans les trois conditions C_1 , C_2 , et C_3 suivantes :

- C_1 : aucun retour sensoriel,
- C_2 : un retour visuel (changement de couleur),

- C_3 : un retour sonore.

Afin qu'ils s'approprient le système, les sujets ont réalisé une fois la tâche dans la condition C_1 , avant de commencer les passations. Celle-ci devait être répétée 4 fois par condition avec un temps de repos de 20 s entre chaque essai. La fréquence de rafraîchissement des images était supérieure à 30 Ips. Pour toutes les conditions, un retour visuel (changement de couleur de l'objet impacté : lampe, boîtier, et tapis de dépose) était associé aux événements suivants : (1) *collision curseur-lampe*, (2) *collision lampe-boîtier*, (3) *collision lampe-tapis de dépose*. Ainsi, lorsqu'une collision entre le curseur et l'une des lampes survenait, sa couleur bleue (RGB = 0.0, 0.0, 1.0) devenait plus claire (RGB = 0.2, 0.2, 1.0). De même, dès qu'une lampe entrait en contact avec le boîtier ou le tapis, sa couleur passait de bleue (RGB = 0.0, 0.0, 1.0) à rouge (RGB = 1.0, 0.0, 0.0). Ces indices visuels ont été implémentés pour faciliter la préhension et la dépose des lampes et les collisions avec le boîtier. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé. Le *SPIDAR* a été utilisé pour mesurer la position de la main de l'opérateur et pour simuler le poids des lampes. Le gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* a été utilisé pour la manipulation des lampes. Deux états (ouvert et fermé) ont été implémentés. Afin de renforcer la perception visuelle de la profondeur, un affichage stéréoscopique des images a été utilisé. Les sujets étaient installés sur une chaise, face à l'écran de la plate-forme. Le temps de réalisation de chaque essai a été enregistré via un buzzer que les sujets devaient activer au départ de la tâche et désactiver une fois que la dernière lampe avait été correctement placée dans le boîtier. Comme dans l'expérience précédente, un questionnaire a été soumis à chaque sujet afin de recueillir des informations subjectives.

5.3.4 Résultats

Dans une première partie, nous examinons le temps de réalisation de la tâche en fonction des conditions expérimentales, puis nous nous intéressons à l'erreur de placement des lampes dans le boîtier. L'influence des conditions expérimentales sur ces deux critères de performance est analysée à travers une ANOVA. Nous faisons également état des informations relevées au cours des passations (difficultés rencontrées, stratégies adoptées, comportement des sujets, etc.).

5.3.4.1 Temps de réalisation

Les temps de réalisation de la tâche pour les différentes conditions expérimentales sont illustrés à la **figure 5.5**. L'analyse de variance n'a pas révélé d'effet significatif ($F(2,17) = 0.04$; $p < 0.96$). En absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche était de 63.5s (std = 16.9). En présence des retours visuel et sonore, le temps de réalisation était de 61.97s (std = 12.3) et de 63.94s (std = 15.6) respectivement.

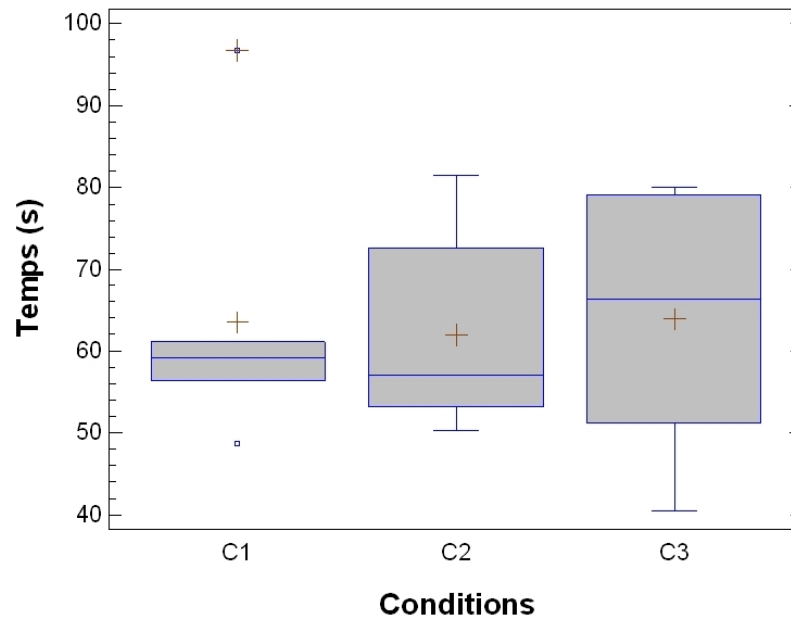


FIGURE 5.5 – Temps de réalisation de la tâche de maintenance pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d’information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour sonore.

5.3.4.2 Erreur de placement

Les erreurs relatives au placement des lampes dans le boîtier sont présentées à la **figure 5.6**. L’ANOVA nous indique que la présence d’un retour d’information conduit à une amélioration significative des performances ($F(2,17) = 27.80$; $p < 0.05$). En effet, l’erreur enregistrée en absence de retour d’information a été en moyenne de 2.8cm (std = 0.67), alors qu’en présence du retour visuel et du retour sonore, celle-ci a été respectivement de 1.35cm (std = 0.14) et de 1.15cm (std = 0.22). Ceci reflète une augmentation de la précision de 52% pour le retour visuel et de 59% pour retour sonore. Nous observons aussi que les retours d’information contribuent à une diminution importante de la disparité des performances. En effet, les écart-types associés aux retours visuel et sonore sont respectivement plus de 5 et 3 fois inférieurs à l’écart-type obtenu en absence de retour d’information.

5.3.4.3 Apprentissage

Afin d’examiner plus en détail l’influence des conditions expérimentales sur le temps de réalisation de la tâche, nous avons étudié son évolution au cours des essais successifs. Les résultats sont représentés sur la **figure 5.7**.

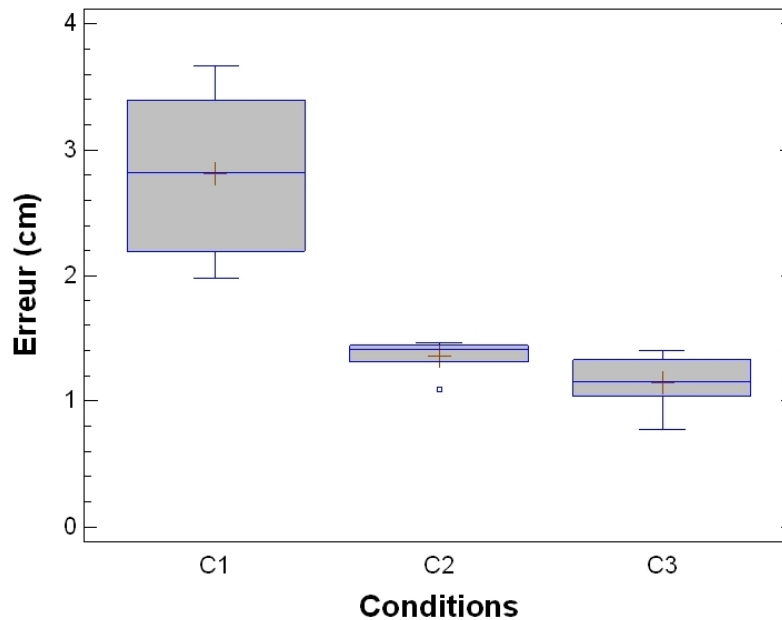


FIGURE 5.6 – Erreurs de placement des lampes pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour sonore.

Nous observons qu'en absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation a été de 76.3s (std = 31.9) au premier essai et de 59.3s (std = 8.53) au dernier. En présence d'un retour visuel ou sonore, ce temps a été respectivement de 64.3s (std = 16.3) et 70.1s (std = 22.4) au premier essai, et de 60.6s (std = 15.9) et 61.3s (std = 13.5) au dernier. Ces résultats montrent une amélioration de la performance de 22%, 5.75% et 12.55% pour les conditions C_1 , C_2 et C_3 respectivement. On remarque que pour la condition C_2 , le temps de réalisation de la tâche est faible dès le début, ce qui révèle une bonne pertinence du retour visuel.

Les processus d'apprentissage liés à l'erreur de placement des lampes sont illustrés à la **figure 5.8**. On remarque qu'en absence de retour sensoriel l'erreur moyenne a été de 3.4 cm (std = 2.7) au premier essai et de 2.55cm (std = 1.3) au dernier. En présence des retours visuel et sonore, cette erreur de placement a diminué respectivement à 1.18cm (std = 0.32) et 1.3cm (std = 0.17) au premier essai et à 1.14cm (std = 0.32) et 1.16cm (std = 0.33) au dernier. Ces résultats montrent une amélioration de la précision de 25%, 3,39% et 10,77% pour les conditions C_1 , C_2 et C_3 . On n'observe aucun apprentissage lié au retour sonore (condition C_3). En effet, l'impact de ce retour sensoriel se manifeste dès le premier essai et reste constant jusqu'au dernier.

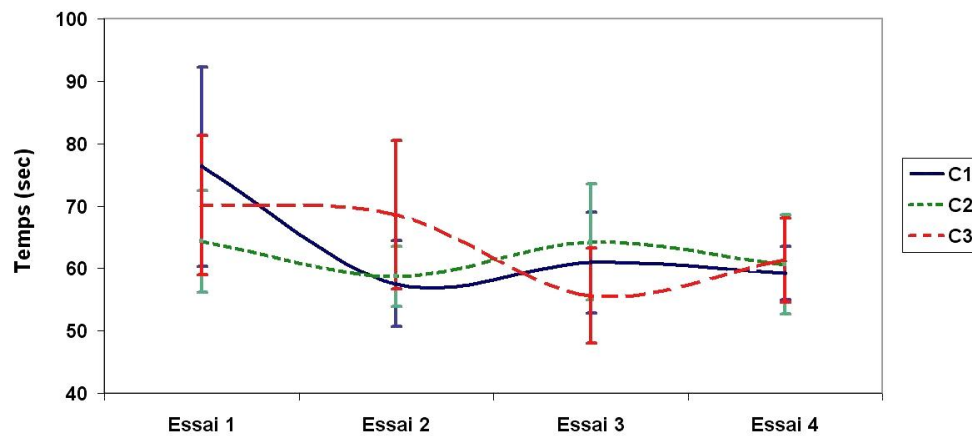


FIGURE 5.7 – Evolution du temps de réalisation de la tâche de maintenance pour les différentes conditions expérimentales : sans retour d’information C_1 , avec retour visuel C_2 , avec retour sonore C_3 .

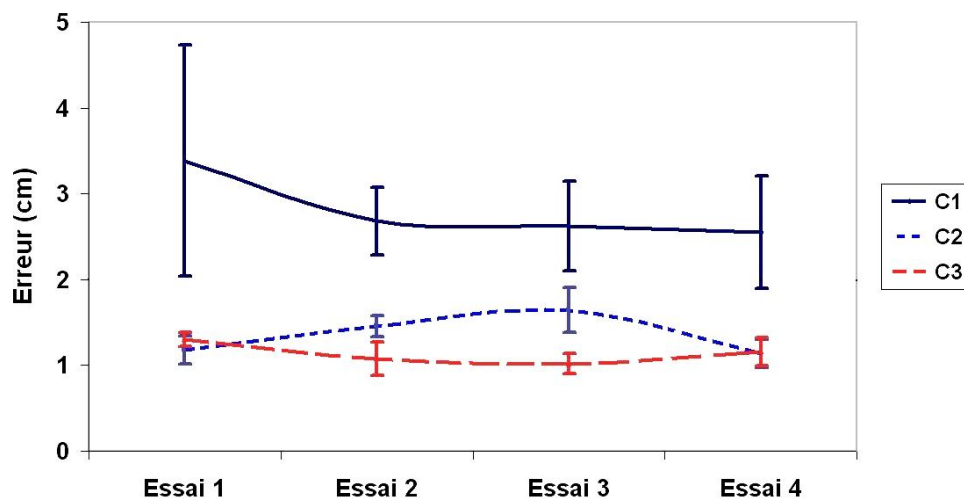


FIGURE 5.8 – Evolution de l’erreur de placement pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d’information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour sonore.

On remarque pour le retour visuel (condition C_2), une légère augmentation de l'erreur de placement qui peut être due à une surcharge du canal visuel.

5.3.4.4 Aspects subjectifs

L'observation des sujets, réalisée au cours de l'expérience, a révélé que ceux-ci n'avaient aucune difficulté pour effectuer la tâche. La plate-forme a été jugée efficace pour simuler ce type de tâche. Cependant, nous avons remarqué que certains sujets dépassaient largement le boîtier avant de revenir vers celui-ci pour y positionner correctement les lampes. D'autres sujets passaient régulièrement le curseur à travers le boîtier. Ceci reflète, malgré un affichage stéréoscopique, un manque d'appréciation de la distance entre la main et le boîtier (perception de la profondeur). Dans la zone de tolérance, le retour sonore a été jugé plus pertinent que le retour visuel. Cependant, certains sujets ont évoqué une gêne sonore récurrente due à la persistance du son, quand les lampes se trouvaient dans la zone de tolérance. Pour les sujets, la tâche la plus difficile à réaliser était le placement des lampes.

5.4 Tâche de maintenance avec retour dynamique

Cette expérimentation est basée sur la même tâche que l'expérience précédente. Cependant la configuration proposée offre plus de liberté de mouvement. En effet, celle-ci est basée sur le système de capture par caméras infrarouges présenté au chapitre précédent. Des retours d'information dynamiques ont également été implémentés afin d'aider l'opérateur dans sa tâche.

5.4.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est d'analyser l'influence de retours sensoriels dynamiques. Ces retours, visuel et vibro-tactile, sont activés dès la saisie d'une lampe et assistent l'opérateur dans ses mouvements. L'hypothèse soutenue est qu'une telle assistance perceptuelle permet d'aider l'utilisateur dans le déplacement et le positionnement des lampes.

5.4.2 Tâche

Comme dans l'expérimentation précédente, la tâche consistait à remplacer un jeu de trois lampes placées à l'intérieur d'un boîtier. La différence essentielle réside dans l'utilisation (1) d'un système de capture de mouvement par caméras infrarouges et d'un gant à retour tactile sans fil et (2) de retours d'information (visuel et vibro-tactile) dynamiques permettant d'assister l'opérateur. Les lampes devaient être saisies et manipulées à l'aide du gant à retour tactile équipé de trois réflecteurs infrarouges (**Figure 5.9**). Une zone de tolérance de 0,35 cm, centrée sur la position désirée, a été définie pour le placement des lampes.



FIGURE 5.9 – Gant de données *5DT Data Glove 14* ddl équipé d'un vibro-moteur et de réflecteurs infrarouges. Un autre vibro-moteur a été placé sur l'avant-bras de l'opérateur.

5.4.3 Protocole

Six sujets volontaires devaient réaliser la tâche définie précédemment dans les trois conditions C_1 , C_2 , et C_3 suivantes :

- C_1 : aucun retour sensoriel,
- C_2 : un retour visuel (variation de la couleur des lampes),
- C_3 : un retour vibro-tactile (vibro-moteur placé sur l'avant bras).

La tâche devait être répétée 3 fois successivement pour chaque condition. Un temps de repos de 20 s entre chaque essai était pris. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé. Aux événements *collision curseur-lampe*, *collision lampe-boîtier*, *collision lampe-tapis* de dépose, étaient associés un retour tactile pour la condition C_3 , un retour visuel pour la condition C_2 , et aucun retour sensoriel pour la condition C_1 .

Avant de commencer l'expérimentation, la tâche a été réalisée par un expert. Ainsi, les sujets n'ont pas effectué d'entraînement préalable. La fréquence de rafraîchissement des images était supérieure à 30 Ips. Pour la condition C_2 , la couleur initiale des lampes (RGB = 0.2, 0.2, 1.0) devenait plus foncée (RGB = 0.0, 0.0, 1.0) lors de l'impact du curseur, avant la préhension des lampes. Lorsque la saisie d'une lampe était validée par la fermeture du gant, sa couleur bleue (RGB = 0.0, 0.0, 1.0) passait alors à vert foncé (RGB = 0.0, 0.2, 0.0). Lorsque les sujets déplaçaient une lampe en direction de sa position désirée dans le boîtier, sa couleur (RGB = 0.0, 0.2, 0.0) passait successivement par quatre nuances de vert (**Figure 5.10**), comme indiqué dans le tableau 5.11.

Lors de la collision d'une lampe avec le boîtier ou le tapis de dépose, leur couleur initiale passe à la couleur rouge (RGB = 1.0, 0.0, 0.0). En ce qui concerne la

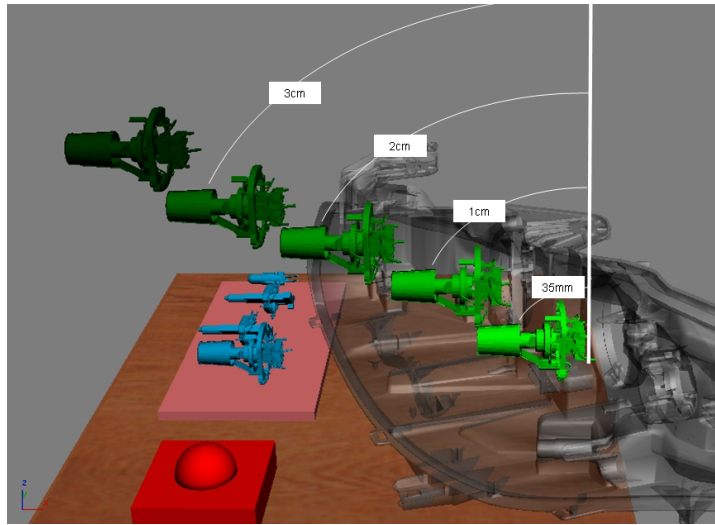


FIGURE 5.10 – Illustration des intervalles d’activation des retours visuel et tactile.

condition C_3 , deux zones de stimulation ont été définies : la première au niveau de l’avant-bras, pour le retour vibro-tactile dynamique, la deuxième sur l’extrémité de l’index pour rendre compte des collisions (**Figure 5.9**). Les intervalles d’activation sont les mêmes que pour la condition C_2 (**Figure 5.10**). Les stimulations vibro-tactiles sur l’avant-bras avaient une amplitude variable en fonction de la distance qui sépare les lampes de leur position désirée dans le boîtier. Les valeurs précises sont données dans le tableau 5.12.

| | | |
|-----------------------|---|---------------------|
| $D \geq 3cm$ | → | RGB = 0.0, 0.2, 0.0 |
| $3cm > D \geq 2cm$ | → | RGB = 0.0, 0.4, 0.0 |
| $2cm > D \geq 1cm$ | → | RGB = 0.0, 0.6, 0.0 |
| $1cm > D \geq 0.35cm$ | → | RGB = 0.0, 0.8, 0.0 |
| $D < 0.35cm$ | → | RGB = 0.0, 1.0, 0.0 |

FIGURE 5.11 – Valeurs RGB de la couleur de la lampe pour les intervalles de position considérés.

| | | | | |
|-----------------------|---|----------------|---|-----------|
| $D \geq 3cm$ | → | freq= 100 Hz | → | F = 0.2 N |
| $3cm > D \geq 2cm$ | → | freq = 200 Hz | → | F = 0.5 N |
| $2cm > D \geq 1cm$ | → | freq = 300 Hz | → | F = 0.8 N |
| $1cm > D \geq 0.35cm$ | → | freq = 400 Hz | → | F = 1.0 N |
| $D < 0.35cm$ | → | freq = 1000 Hz | → | F = 2.2 N |

FIGURE 5.12 – Valeurs de la fréquence et de l’amplitude des stimulations vibro-tactiles pour les intervalles de position considérés.

Les sujets étaient installés face à l’écran, au centre de l’espace de travail de la plate-forme (**Figure 5.13**). Le système de capture par cameras infrarouges était utilisé dans le but de diminuer l’effet de dérive en position du *SPIDAR* et



FIGURE 5.13 – Sujet réalisant la tâche de maintenance en utilisant le système de capture par caméras infrarouges et le gant de données *5DT Data Glove 14 ddl*.

de donner à l'utilisateur une plus grande liberté de mouvements. Le temps de réalisation de chaque essai était enregistré via un buzzer que les sujets devaient activer avant de prendre la première lampe et désactiver une fois les 3 lampes correctement placées dans le boîtier. Afin de recueillir des données subjectives, un questionnaire a été soumis à chaque sujet à la fin de l'expérience.

5.4.4 Résultats

Dans cette section nous présentons les résultats de l'expérimentation. Dans une première partie, nous analysons l'influence des retours sensoriels sur (1) le temps d'exécution de la tâche et sur (2) l'erreur de placement des lampes dans le boîtier. Les résultats sont analysés à travers une ANOVA. Nous examinons également les aspects subjectifs de l'expérience via un questionnaire, et faisons état des informations notées pendant l'expérience.

5.4.4.1 Temps de réalisation

Les résultats, illustrés à la **figure 5.14**, indiquent que les retours sensoriels ont une influence significative sur le temps de réalisation de la tâche ($F(2,5) = 5.47$; $P < 0.05$). En effet, en absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche était de 87.07s (std = 14.26). En présence des retours visuel et tactile, le temps de réalisation a diminué pour atteindre 71.33s (std = 4.08) et 66.91s (std = 9.23) respectivement. L'ANOVA n'indique aucune différence significative entre les performances obtenues avec le retour visuel et le retour tactile. Nous remarquons que les écart-types liés aux conditions impliquant un retour sensoriel sont plus faibles. En effet, leur amplitude est divisée par 3.5 pour le retour visuel et par 1.5 pour le retour tactile.

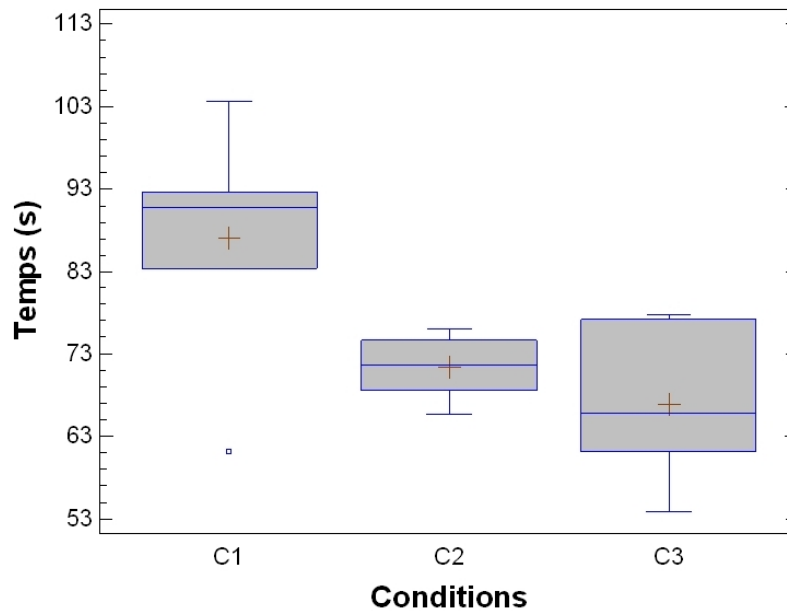


FIGURE 5.14 – Temps de réalisation de la tâche en fonction des différentes conditions expérimentales : (C_1) aucun retour sensoriel, (C_2) un retour visuel et (C_3) un retour vibro-tactile.

5.4.4.2 Erreur de placement

Comme pour l'expérience précédente, les résultats, illustrés à la **figure 5.15** montrent que l'influence des retours sensoriels est significative ($F(2,5) = 17.97$; $P < 0.05$). En effet, en absence de retour sensoriel, l'erreur de placement a été en moyenne de 2.64cm (std = 0.68). Par contre, en présence des retours visuel et tactile, celle-ci a été respectivement de 1.41cm (std = 0.36) et de 1.68cm (std = 0.31). L'ANOVA indique une différence significative entre la performance obtenue dans la condition C_1 et celle obtenue dans les conditions C_2 et C_3 . Par contre aucune différence significative n'a été observée entre ces dernières conditions. Nous remarquons que les écart-types liés aux conditions impliquant un retour sensoriel sont plus faibles. En effet, leur amplitude a été divisée par deux.

5.4.4.3 Apprentissage

Afin d'examiner plus en détail l'influence des retour sensoriels, nous avons analysé l'évolution de la performance au cours des passations. Les processus qui nous intéressent ici sont représentés sur les figures **5.16** et **5.17**. Nous observons une diminution du temps de réalisation de la tâche pour chacune des conditions C_1 , C_2 , et C_3 . En effet, les temps obtenus étaient respectivement de 97.26s (std = 17.88), 76.31s (std = 7.96) et 69.20s (std = 10.88) lors du premier essai, et respectivement de 80.96s (std = 14.21), 67.13s (std = 8.05) et 65.23s (std = 11.31)

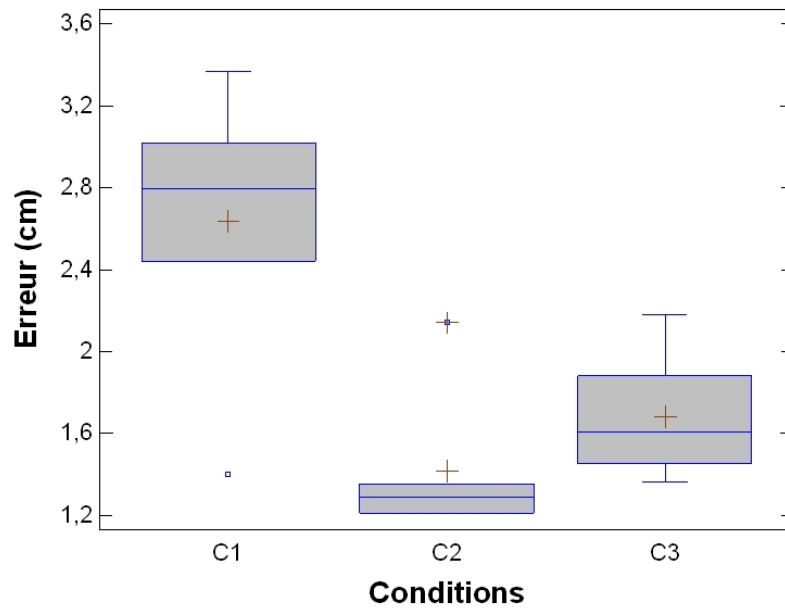


FIGURE 5.15 – Erreurs de placement des lampes en fonction des différentes conditions expérimentales : C_1 aucun retour sensoriel, C_2 un retour visuel et C_3 un retour vibro-tactile.

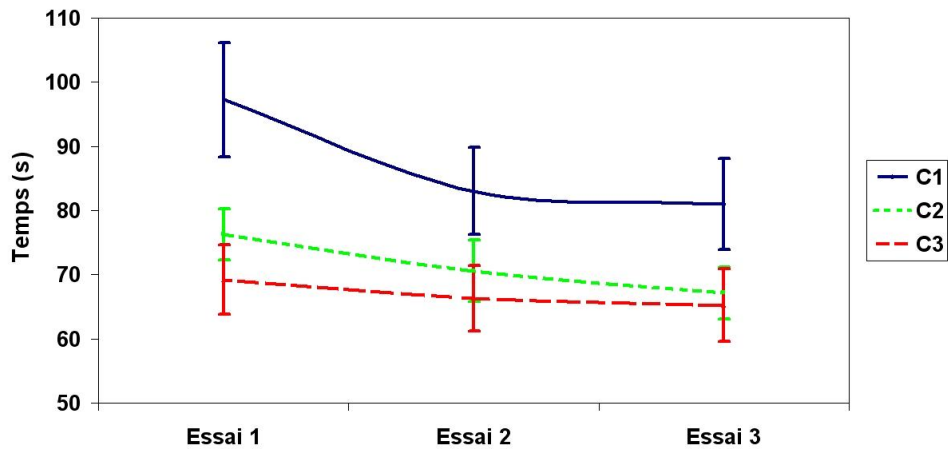


FIGURE 5.16 – Processus d'apprentissage lié au temps d'exécution de la tâche en fonction des conditions expérimentales : (C_1) aucun retour sensoriel, (C_2) un retour visuel et (C_3) un retour vibro-tactile.

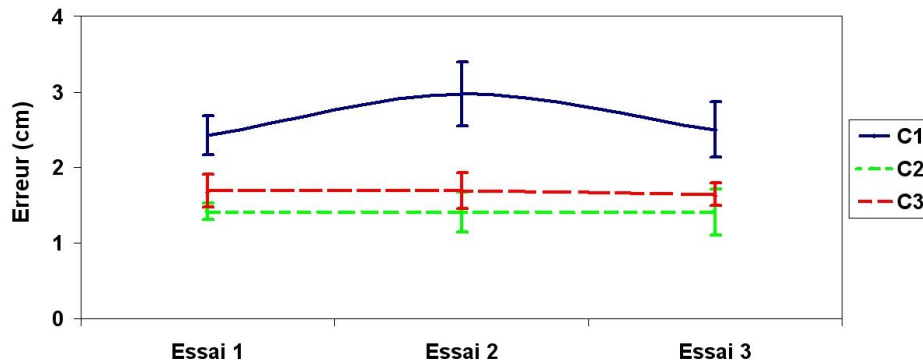


FIGURE 5.17 – Apprentissage relatif au placement des lampes en fonction des différentes conditions expérimentales : (C_1) aucun retour sensoriel, (C_2) un retour visuel et (C_3) un retour vibro-tactile.

lors du dernier. Concernant l'erreur de placement des lampes, nous constatons qu'en présence des retours visuel et tactile, l'erreur moyenne reste constante au cours des essais. En effet, celle-ci était respectivement de 1.42cm (std = 0.23) et de 1.69cm (std = 0.44) au premier essai et de 1.41cm (std = 0.6) et 1.65cm (std = 0.3) au dernier. Par contre, en absence de retour sensoriel, l'erreur était de 2.43cm (std = 0.52) au premier essai et de 2.5cm (std = 0.74) au dernier, en passant par une dégradation nette de la performance. Ainsi, la présence des retours visuel et tactile ont permis un apprentissage global de la tâche (diminution du temps d'exécution et erreur moyenne stable).

5.4.5 Aspects subjectifs

Les sujets ont indiqué que les retours visuels et tactiles permettaient de déterminer la position désirée des lampes plus rapidement et avec plus de précision. Ils ont aussi indiqué que les changements de couleur étaient plus facilement détectables que les changements de fréquence des vibro-moteurs. En outre, ils ont jugé le retour tactile relativement perturbant pendant la phase d'approche (haute fréquence). Ils ont ainsi préféré le retour visuel au retour tactile. Certains sujets ont indiqué qu'en absence de retour d'information, ils étaient moins appliqués dans le placement des lampes dans le boîtier, ce qui peut expliquer l'augmentation de l'erreur de placement.

5.5 Tâche préliminaire d'extraction en environnement moteur[30]

Cette expérimentation a permis de confronter des opérateurs à une tâche d'extraction et de remplacement de lampes en environnement moteur. Cette tâche nécessite de mesurer la position et l'orientation de la main de l'utilisateur. Afin de renforcer le réalisme de la préhension de la lampe, nous avons utilisé l'accessoire

(prop) décrit précédemment.

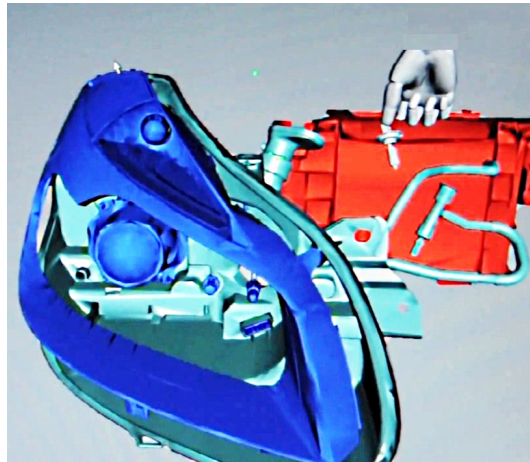


FIGURE 5.18 – Préhension et extraction de la lampe en environnement moteur. La collision est illustrée par un changement de couleur de l'objet impacté.

5.5.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation est multiple. Il s'agit (1) d'étudier la pertinence et l'influence du retour d'effort, appliqué via le *SPIDAR* lors d'une tâche d'extraction et de remplacement de lampe en environnement moteur, et (2) d'étudier la substitution du retour d'effort par un retour visuel. L'hypothèse que nous soutenons est qu'un retour d'effort permet à l'opérateur d'appréhender de manière efficace les collisions ainsi que la structure tridimensionnelle du prototype. Nous faisons aussi l'hypothèse que le retour visuel proposé permet une performance similaire à celle obtenue avec le retour d'effort.

5.5.2 Tâche

La tâche, illustrée à la **figure 5.18**, était d'extraire la lampe de l'environnement moteur et de la replacer correctement, en évitant d'entrer en collision avec le prototype virtuel. L'accessoire contenant une lampe réelle (prop) a été intégré au *SPIDAR* (**figure 5.19a**), afin d'augmenter le réalisme de la simulation (perception haptique de la lampe réelle).

5.5.3 Protocole

Six sujets ont participé à cette expérience. Ils avaient une vision normale ou corrigée, et devaient effectuer la tâche trois fois successivement, avec un temps de repos de 20 s entre les essais, dans les trois conditions C_1 , C_2 , et C_3 suivantes :

- C_1 : aucun retour sensoriel,

- C_2 : un retour visuel (changement de couleur de la pièce impactée),
- C_3 : un retour d'effort (*SPIDAR* + prop).

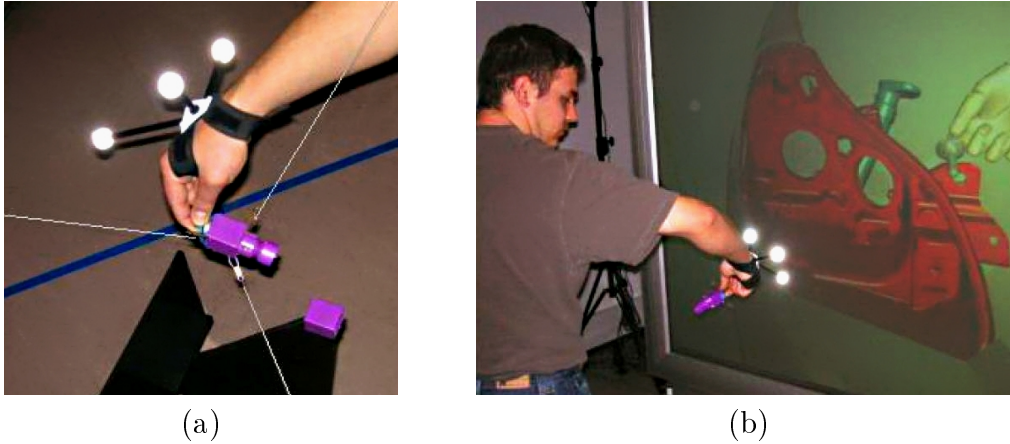


FIGURE 5.19 – Accessoire contenant la lampe (prop) intégré au *SPIDAR* (a) et opérateur effectuant la tâche (b).

Afin qu'ils puissent s'approprier le système, les sujets ont réalisé une fois la tâche dans la condition C_1 , avant de commencer l'expérience. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé afin d'éviter tout biais dû au transfert d'apprentissage. Les retours sensoriels ont été associés aux contacts *main/lampe - prototype virtuel*. Ainsi, lorsque la main ou la lampe entrait en collision avec le prototype virtuel, un changement de couleur (**Figure 5.19 (b)**) ou un retour d'effort étaient activés. Les sujets étaient installés face à l'écran, au centre de l'espace de travail de la plate-forme. La fréquence de rafraîchissement était supérieure à 30 Ips. Le temps de réalisation de chaque essai était enregistré et un questionnaire a été soumis à chaque sujet à la fin de l'expérience.

5.5.4 Résultats

Dans cette section, nous analysons l'influence du retour visuel et du retour d'effort (i) sur le temps de réalisation de la tâche et (ii) sur le nombre de collisions enregistrées. Nous analysons également le processus d'apprentissage lié à chaque condition. Puis, nous examinons les aspects subjectifs (informations recueillies via un questionnaire). Nous faisons également état des informations notées pendant l'expérience (difficultés rencontrées, stratégies adoptées, comportement des sujets, etc.).

5.5.4.1 Temps de réalisation

Les résultats, illustrés à la figure 5.20, indiquent un effet significatif des retours sensoriels sur la performance ($F(2,5) = 10.31$, $P < 0.005$). En absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche était de 28.33s (std = 3.7).

En présence du retour visuel et du retour d'effort, il est passé respectivement à 23.33s (std = 1.8) et à 18.38s (std = 3.4). Nous constatons que les retours sensoriels proposés ont permis d'augmenter la performance des sujets d'environ 17.8% et 35.2%, respectivement. Plus précisément, l'ANOVA indique que le retour d'effort conduit à une meilleure performance que le retour visuel.

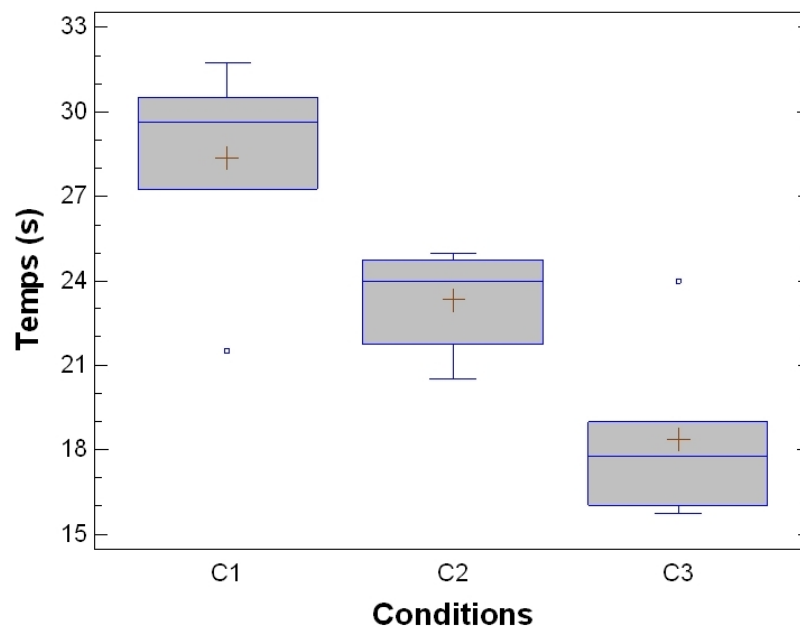


FIGURE 5.20 – Temps moyens d'extraction et de remplacement de la lampe en environnement moteur, pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

5.5.4.2 Collisions avec le prototype

En ce qui concerne les collisions avec le prototype virtuel, les résultats illustrés à la **figure 5.21**, indiquent un effet significatif des retours sensoriels ($F(2,5) = 10.31$, $P < 0.05$). Le nombre de collisions enregistrées au cours de la simulation était de 6.29 (std = 0.7) lorsque aucun retour n'était présent. Par contre, en présence du retour visuel et du retour d'effort, ce nombre est passé respectivement à 4.71 (std = 0.10) et 3.63 (std = 0.65). Nous constatons donc que les retours sensoriels proposés ont permis d'augmenter la performance d'environ 25% (retour visuel) et 42% (retour d'effort). Plus précisément, l'ANOVA indique que le retour d'effort conduit à une meilleure performance que le retour visuel (gain de 23%). Ainsi, nous considérons que le retour d'effort est très pertinent dans ce type de tâche, et que notre hypothèse concernant le retour visuel est partiellement validée.

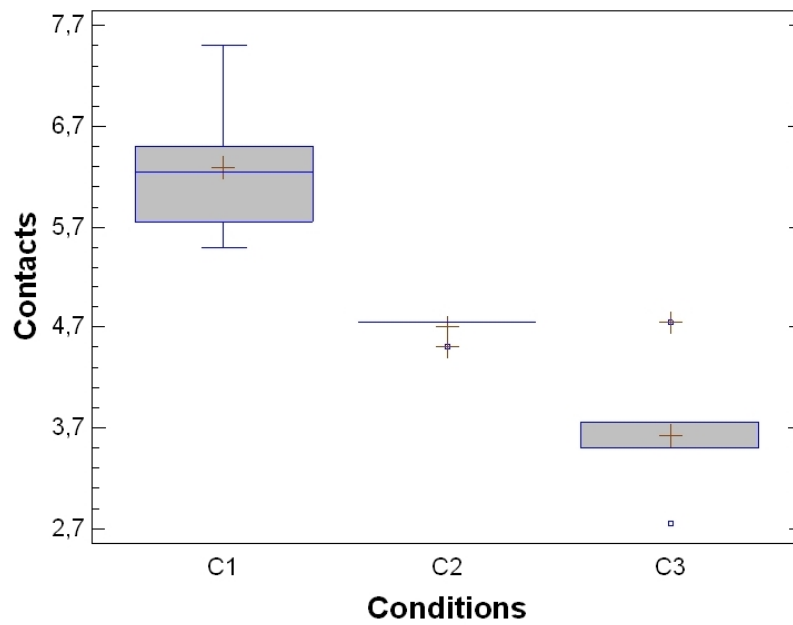


FIGURE 5.21 – Nombre moyen de collisions lors de l'extraction et du remplacement de la lampe en environnement moteur, pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

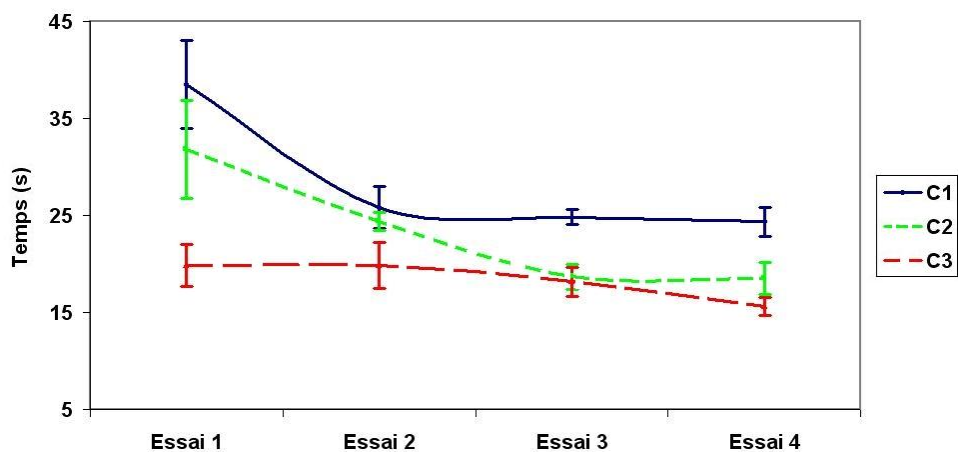


FIGURE 5.22 – Evolution du temps d'extraction et de remplacement de la lampe en environnement moteur pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

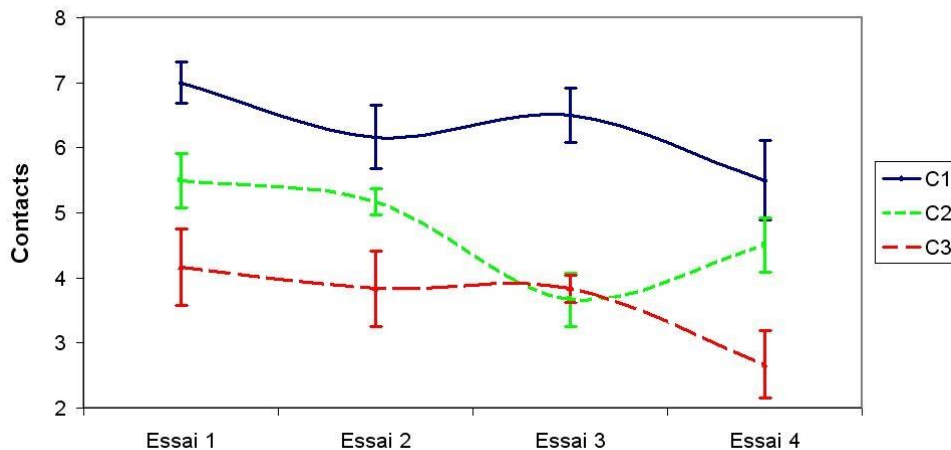


FIGURE 5.23 – Evolution du nombre de collisions lors de l'extraction et du repositionnement de la lampe en environnement moteur pour les différentes conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

5.5.4.3 Apprentissage

Afin d'examiner plus précisément l'influence des retours sensoriels proposés, nous avons analysé l'évolution de la performance (temps de réalisation et nombre de collisions). Cette évolution est représentée sur les figures 5.22 et 5.23. En ce qui concerne le temps de réalisation de la tâche, nous observons une diminution importante, puis un plateau à partir du troisième essai pour les conditions C_1 (sans retour) et C_2 (retour visuel). En effet, les temps obtenus étaient respectivement de 38.5s (std = 9.0) et de 31.83s (std = 10.1) lors du premier essai, et de 24.33s (std = 2.94) et 18.5s (std = 3.33) lors du dernier. Pour la condition C_3 (retour d'effort), nous constatons une évolution moins importante, la performance obtenue dès le premier essai étant nettement meilleure que celle obtenue dans les autres conditions. Ces résultats montrent une amélioration du temps de réalisation de la tâche de 37%, 40% et 20% pour les conditions C_1 , C_2 et C_3 respectivement. En ce qui concerne le nombre de collisions, nous constatons qu'en absence de retour sensoriel ou en présence du retour d'effort, celui-ci diminue régulièrement. En effet, il était respectivement de 7.0 (std = 0.63) et de 4.17 (std = 1.17) au premier essai et de 5.5 (std = 1.23) et 2.67 (std = 1.0) au dernier. Par contre, en ce qui concerne le retour visuel, nous observons une diminution rapide du nombre de collisions lors des trois premiers essais (de 5.5 à 3.7), puis une augmentation (4.5) au dernier essai. Cette diminution est peut-être due à une perte de concentration.

En résumé, nous avons observé un apprentissage global pour les trois conditions, avec toutefois une augmentation du nombre des collisions aux derniers essais, avec le retour visuel. Notons qu'avec le retour d'effort, nous avons une amélioration conjointe du temps de réalisation de la tâche et du nombre de collisions.

Ainsi, notre hypothèse concernant la pertinence du retour d'effort dans ce type de tâche est validée. Cependant, nous ne pouvons pas affirmer que le retour visuel ne conduit pas à une performance similaire.

5.5.5 Aspects subjectifs

Nous avons observé que les sujets ont effectué la tâche avec une facilité croissante au cours des passations. Ceux-ci ont indiqué que le retour visuel permettait d'appréhender les collisions avec le prototype, de manière moins efficace que le retour d'effort. En outre, ils ont signalé une certaine fatigue visuelle liée à une mauvaise perception de la profondeur. La partie de la tâche jugée la plus difficile était le remplacement de la lampe.

5.6 Intervention dextre en environnement moteur[31, 32]

Comme dans l'expérimentation précédente, les opérateurs ont été confrontés à un scénario d'extraction de lampe en environnement moteur. Cependant, la tâche proposée implique l'utilisation d'un modèle biomécanique humain permettant d'animer en temps réel un avatar. Les sujets ont donc été équipés du gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* et de réflecteurs infrarouges. Afin de palier les problèmes d'instabilité liés à l'utilisation du moteur physique *NovodeXTM*, une aide logicielle a été implémentée.

5.6.1 Objectif

L'objectif de cette expérimentation était d'étudier la performance humaine dans une tâche réaliste d'extraction et de remplacement d'une lampe en environnement moteur. Comme dans l'expérience précédente, l'influence d'un retour visuel et d'un retour d'effort, appliqué via le *SPIDAR*, est analysée.

5.6.2 Tâche

La tâche demandée aux sujets était constituée des actions suivantes :

1. accéder à une lampe située dans l'environnement moteur,
2. saisir et extraire la lampe de l'environnement,
3. replacer cette lampe à sa position initiale.

Au cours de cette tâche, l'opérateur devait éviter d'entrer en collision avec le prototype virtuel. L'avatar de l'opérateur était constitué d'un avant-bras et

d'une main articulée (**Figure 5.24**). Afin de permettre une meilleure appréhension de la structure tridimensionnelle de l'environnement et du prototype virtuel, nous avons implémenté un module de suivi des mouvements de tête (en position uniquement). Ainsi, l'opérateur portait une casquette équipée d'un réflecteur infrarouge. L'aide logicielle, qui a été implémentée pour palier aux problèmes d'instabilité lors de la préhension de la lampe, est basée sur la définition de trois zones d'interaction. Celles-ci sont illustrées à la **figure 5.25**.

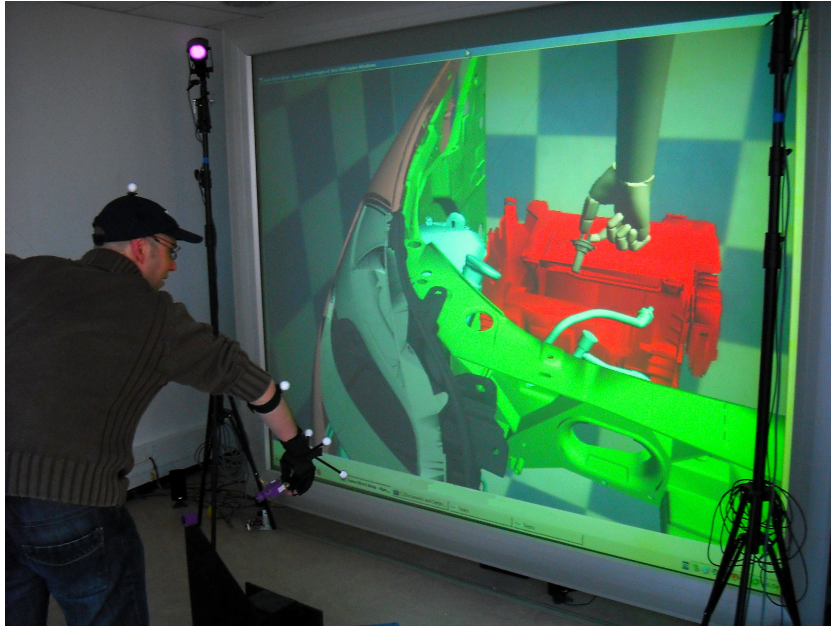


FIGURE 5.24 – Illustration de la tâche d'extraction et de remplacement d'une lampe en environnement moteur. L'opérateur porte un gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* équipé de réflecteurs infrarouges permettant d'animer l'avant-bras et la main virtuelle.

La variable d représente la distance entre la main virtuelle et la lampe à extraire de l'environnement moteur. Dans la première zone ($d > d_1$ avec $d_1 = 10\text{cm}$), l'avant-bras et la main virtuelle sont animés en temps réel à l'aide du système de capture de mouvement et du gant de données. Dans la seconde ($d_1 > d > d_2$, avec $d_2 = 5\text{mm}$), la main virtuelle se met en mode préhension, indiquant à l'opérateur la posture adaptée pour saisir la lampe. Enfin, dans la zone finale ($d < d_2$), la lampe est automatiquement attachée à la main virtuelle. L'opérateur n'a alors plus la possibilité de bouger les doigts de la main virtuelle et garde donc sa main réelle fermée sur le prop.

5.6.3 Protocole

Douze sujets ont participé à cette expérience. Tous avaient une vision normale ou corrigée, et devaient effectuer la tâche décrite ci-dessus 3 fois successivement avec un temps de repos de 20 sec, dans les trois conditions C_1 , C_2 , et C_3 suivantes :

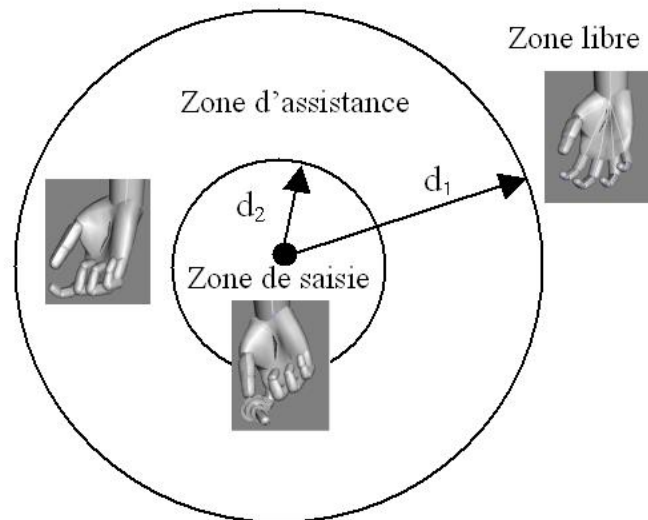


FIGURE 5.25 – Illustration des zones définies pour l'aide à la préhension de la lampe.

- C_1 : aucun retour sensoriel,
- C_2 : un retour visuel (changement de couleur de la pièce impactée),
- C_3 : un retour d'effort sur l'accessoire (prop).

Ces retours sensoriels étaient associés aux événements suivants : (1) collision de la main ou de l'avant-bras avec le prototype virtuel (avant la préhension de la lampe) et (2) collision de l'ensemble avatar/lampe avec le prototype (après la préhension de la lampe). Ainsi, lorsqu'une collision entre la main ou l'avant-bras et une pièce du prototype survenait, celle-ci devenait rouge. Dans la condition C_3 , une force orientée dans la direction opposée au mouvement était appliquée sur l'accessoire tenu par l'opérateur, via le *SPIDAR*. L'ordre de passage des conditions a été contrebalancé. Les sujets étaient debout, face à l'écran, et au centre de l'espace de travail du *SPIDAR*. Le système de capture de mouvement par caméras infrarouges a été utilisé pour mesurer la position et l'orientation de la main virtuelle et de l'avant-bras. Le gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* permettait de mesurer en temps réel, le mouvement des doigts de l'opérateur. Le temps de réalisation de la tâche et le nombre de collisions ont été enregistrés à la fin de chaque essai. Afin de recueillir des données subjectives, un questionnaire a été soumis à chaque sujet à la fin de l'expérience.

5.6.4 Résultats

Dans une première partie, nous analysons l'influence des retours visuel et haptique sur le temps d'exécution de la tâche et sur le nombre de collisions. Comme précédemment, l'influence des conditions expérimentales sur les critères de performance a été analysée à travers une ANOVA. Nous terminons par les

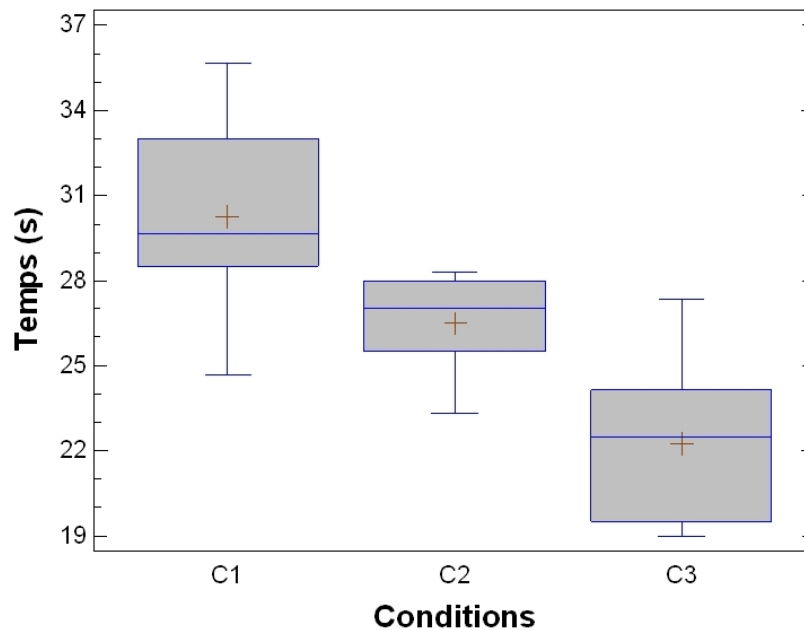


FIGURE 5.26 – Temps de réalisation de la tâche pour les différentes configurations expérimentales : (C_1) sans retour d’information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d’effort.

aspects subjectifs, étudiés à partir des informations recueillies via le questionnaire et l’observation des sujets pendant l’expérience.

5.6.4.1 Temps de réalisation

Les résultats, illustrés à la **figure 5.26**, indiquent un effet relativement important des retours sensoriels ($F(2,11) = 14.08$, $P < 0.05$). En absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche était de 30.34s (std = 3.2). En présence du retour visuel et du retour d’effort, celui-ci est passé respectivement à 26.45s (std = 1.8), et à 22.24s (std = 2.75). Ainsi, nous constatons que ces retours sensoriels ont permis aux sujets d’améliorer leur temps d’intervention d’environ 12.8% avec le retour visuel et d’environ 26.7% avec le retour d’effort. Les résultats indiquent aussi que le retour d’effort est plus efficace que le retour visuel (réduction du temps de 15.9%).

5.6.4.2 Collisions avec le prototype

Les résultats, illustrés à la **figure 5.27**, indiquent que les retours sensoriels ont un effet significatif sur le nombre de collisions ($F(2,11)=63.70$; $p < 0.05$). Comme dans l’expérience précédente, une différence significative entre les conditions C_1 , C_2 et C_3 a été observée. Le nombre moyen de collisions enregistrées ont été de 6.6 (std = 0.58), de 4.83 (std = 0.17) et de 4.05 (std = 0.83) pour les conditions C_1 , C_2 , et C_3 , respectivement. Le changement de couleur de la pièce impactée et le retour d’effort ont donc conduit à une réduction du nombre de collisions

de 27.3% et de 39% respectivement. L'analyse statistique indique encore que le retour d'effort est plus efficace que le retour visuel. En effet, il permet de réduire le temps de collision de 16.2%.

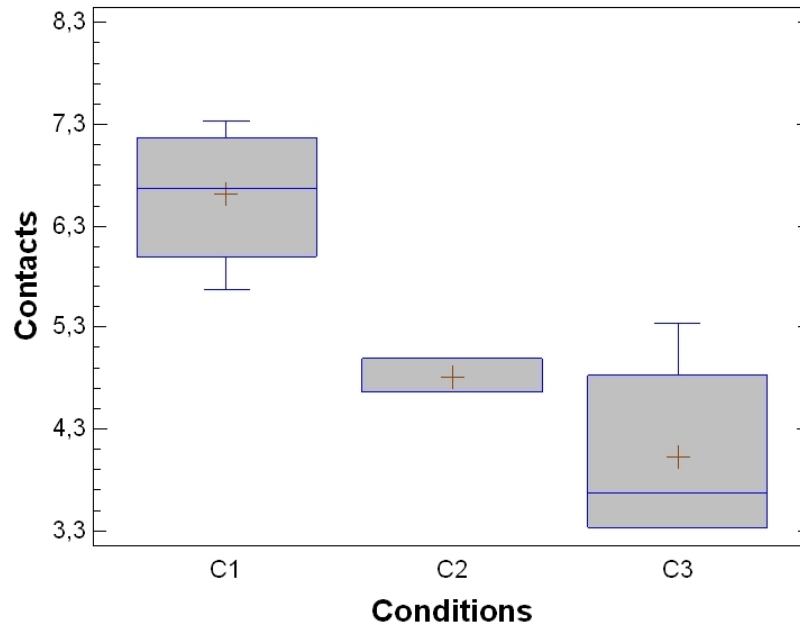


FIGURE 5.27 – Nombre de collisions lors de la tâche, pour les différentes configurations expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

5.6.4.3 Apprentissage

La **figure 5.28** illustre l'évolution du temps de réalisation de la tâche pour les différentes conditions expérimentales étudiées. On observe qu'en absence de retour sensoriel, le temps moyen de réalisation de la tâche a été de 40.17s (std = 5.2) au premier essai et de 25.25s (std = 1.42) au dernier. Les retours visuel et haptique ont permis de réaliser la tâche avec des temps moyens respectifs de 36.67s (std = 5.31) et 29.02s (std = 5.24) au premier essai et de 18.01s (std = 2.23) et 18.01s (std = 2.07) au dernier. Ces résultats illustrent une amélioration de 37.14%, 50.9% et 37.9% pour les conditions C_1 , C_2 et C_3 respectivement. Ainsi, on observe une diminution du temps de réalisation pour toutes les conditions. On remarque que le processus d'apprentissage lié au retour visuel n'est pas terminé.

La **figure 5.29** illustre l'évolution du nombre de collisions pour les différentes configurations expérimentales étudiées. On observe qu'en absence de retour sensoriel, le nombre moyen de collisions avec le prototype était de 7.08 (std = 0.51) au premier essai et de 6.33 (std = 0.89) au dernier. Le changement de couleur de l'objet impacté et le retour d'effort ont permis de réduire ce nombre à 5.58 (std

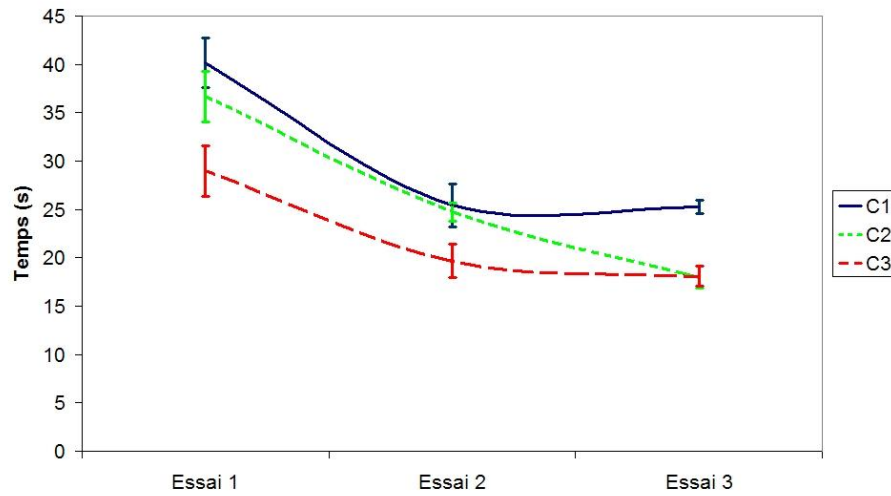


FIGURE 5.28 – Evolution du temps de réalisation de la tâche d'extraction et de remplacement de la lampe en environnement moteur pour les conditions : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

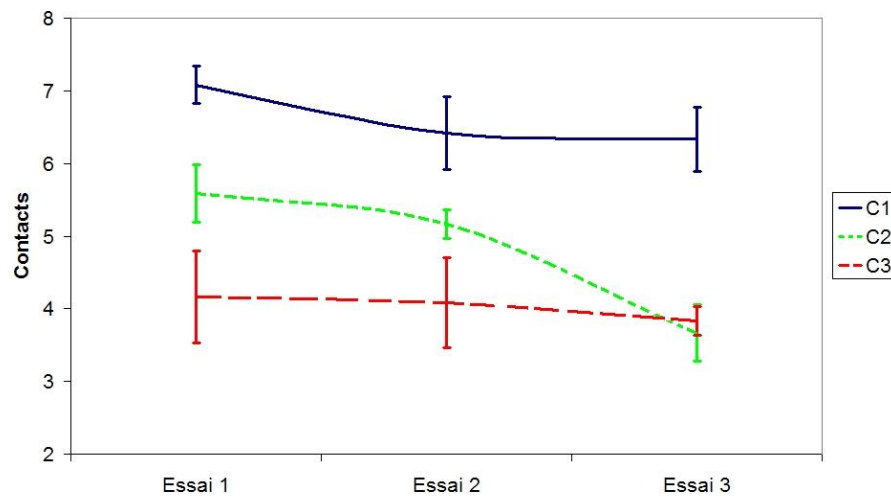


FIGURE 5.29 – Evolution du nombre de collisions pour les conditions expérimentales : (C_1) sans retour d'information, (C_2) avec retour visuel et (C_3) avec retour d'effort.

= 0.79) et 4.17 (std = 1.27) au premier essai et à 3.67 (std = 0.78) et 3.83 (std = 0.39) au dernier, respectivement.

On assiste ainsi à une diminution de 10.63%, 34.3% et 8% du nombre de collisions pour les conditions C_1 , C_2 et C_3 , respectivement. On observe une diminution relativement faible du nombre de collisions pour les conditions C_1 et C_3 . On remarque que pour la condition C_2 (avec retour visuel), la réduction du nombre de collisions est importante et que le processus d'apprentissage n'est pas terminé au bout de trois essais.

5.6.4.4 Aspects subjectifs

Nous avons observé que les sujets ont effectué la tâche sans difficulté. La phase de préhension et de remplacement de la lampe dans le boîtier ont été jugés relativement délicats. Les sujets ont été surpris de pouvoir réaliser la préhension de la lampe aussi facilement. Le suivi des mouvements de tête a été apprécié par l'ensemble des sujets. Comme dans l'expérimentation précédente, ceux-ci ont indiqué que le retour visuel permettait d'appréhender les collisions de manière moins efficace que le retour d'effort, ce dernier ayant été jugé efficace voir indispensable dans ce type de tâche.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mené une série d'expérimentations dont l'objectif était d'étudier la pertinence et l'influence de différents retours sensoriels (visuel, sonore, tactile et kinesthésique) lors de tâches impliquant l'accessibilité, l'extraction et la manipulation de lampes sur prototypes virtuels. Différents paradigmes expérimentaux mettant en oeuvre plusieurs configurations d'interaction ont été proposés et validés. La **figure 5.30** synthétise les résultats selon les critères de chaque expérimentation.

Dans la première expérimentation, l'utilisateur devait accéder à différentes pièces de la maquette virtuelle et entrer en collision avec celles-ci, à l'aide du *SPIDAR*. Les résultats ont montré un effet significatif des retours sensoriels testés (retours visuel, sonore et vibrotactile) sur le temps de réalisation de la tâche. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le retour vibro-tactile. Les retours visuel et sonore ont conduit à des résultats similaires. Le retour vibrotactile a été préféré à cause de la sensation de contact.

Dans la deuxième expérimentation, l'utilisateur devait remplacer un jeu de trois lampes placées à l'intérieur d'un boîtier, toujours à l'aide du *SPIDAR*. L'utilisateur portait un gant de données *5DT Data Glove 14 ddl* pour la préhension et le lâcher des lampes. Les résultats n'ont montré aucun effet significatif des retours sensoriels testés (retours visuel et sonore) sur le temps de réalisation de la tâche. Par contre, nous avons observé un effet très significatif de ces retours sur l'erreur de placement des lampes. Les meilleures performances ont été obtenues en présence du retour sonore. D'ailleurs, celui-ci a été préféré malgré une gêne due à la persistance sonore.

Dans la troisième expérimentation, l'utilisateur devait, comme précédemment, remplacer un jeu de trois lampes placées à l'intérieur d'un boîtier à l'aide du système de capture de mouvements par caméras infrarouges. Les résultats ont montré un effet significatif des retours sensoriels dynamiques (retour visuel et vibro-tactiles) sur le temps de réalisation de la tâche ainsi que sur l'erreur de placement des lampes. Les meilleures performances ont été obtenues en présence du retour visuel. Ce retour a d'ailleurs été préféré.

Dans la quatrième expérimentation, l'utilisateur devait extraire une lampe d'un environnement moteur et la repositionner correctement à l'aide du système de capture de mouvements par caméras infrarouges. Dans cette expérimentation, un prop (lampe réelle fixée au *SPIDAR*) a été utilisé. Les résultats ont montré un effet significatif des retours sensoriels testés (retour visuel et retour d'effort) sur le temps de réalisation de la tâche et sur le nombre de collisions. Les meilleures performances ont été obtenues avec le retour d'effort. Ce dernier a été largement plébiscité.

Enfin, dans la dernière expérimentation, l'utilisateur devait extraire une lampe de l'environnement puis la replacer à l'aide du système de capture de mouvements par caméras infrarouges. De plus, l'avatar de l'opérateur, constitué d'un avant-bras et d'une main articulée, était animé en temps réel via un modèle biomécanique. Pendant l'approche, l'utilisateur pouvait ainsi animer les doigts de la main virtuelle grâce à un gant de données *5DT Data Glove 14 ddl*. Lors de l'extraction et le repositionnement de la lampe, l'utilisateur tenait une lampe réelle fixée au *SPIDAR* (prop). Les résultats ont montré un effet significatif des retours sensoriels testés (retour visuel et retour d'effort) sur le temps de réalisation de la tâche ainsi que sur le nombre de collisions. Comme précédemment, les meilleures performances ont été obtenues avec le retour d'effort.

Les données recueillies via les questionnaires et l'observation des sujets au cours des expérimentations ont montré que le retour vibro-tactile fournissait une sensation de contact et que le retour sonore pouvait se substituer de manière efficace au retour vibro-tactile. Certains sujets ont évoqué une gêne récurrente lors de l'utilisation des retours sonore et vibro-tactile. Le retour visuel (changement de couleur) permet d'obtenir de bonnes performances mais peut engendrer une fatigue visuelle, contrairement au retour tactile et kinesthésique.

En conclusion, nous pouvons affirmer que la configuration finale de notre plateforme (capture de mouvement par caméras infrarouges, retour de force, *SPIDAR*, etc.) est opérationnelle. Celle-ci a été validée pour les tâches envisagées dans ce chapitre.



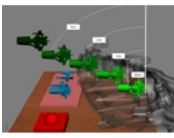

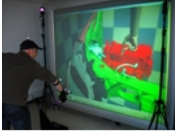
| | visuel | sonore | vibrotactile | force | |
|---|--------|--------|--------------|-------|------------|
|  | + | + | + | | temps |
| | = | + | ++ | | subjectif |
|  | = | = | | | temps |
| | + | + | | | erreur |
| | + | ++ | | | subjectif |
|  | + | | + | | temps |
| | ++ | | + | | erreur |
| | ++ | | = | | subjectif |
|  | + | | | ++ | temps |
| | + | | | ++ | collisions |
| | + | | | ++ | subjectif |
|  | + | | | ++ | temps |
| | + | | | ++ | collisions |
| | + | | | ++ | subjectif |

FIGURE 5.30 – Synthèse des résultats des cinq expérimentations : effet des retours sensoriels testés.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire s’inscrivent dans le cadre du développement des techniques de réalité virtuelle appliquées au prototypage virtuel. Leur originalité réside d’une part dans la méthodologie d’intégration de maquettes numériques issues de la CAO, dans un environnement virtuel. Après une revue des méthodes et outils existants, nous avons proposé une méthodologie de transformation basée sur un protocole complet incluant les trois phases suivantes : simplification, optimisation et physicalisation de maquettes virtuelles. La physicalisation de modèles statiques et de modèles articulés a été traitée via le moteur physique NovodeXTM.

Notre méthodologie a été validée par l’intégration de maquettes industrielles complexes fournies par l’entreprise Valeo Lighting Systems (Angers), en terme de (i) respect de la topologie et géométrie initiales des maquettes, (ii) de temps global d’intégration, (iii) d’extension de la chaîne de conception, et (iv) de pérennité et de capacité d’évolution. Cette méthodologie est indépendante du logiciel de CAO utilisé, et repose uniquement sur un format d’échange de données standard (.stl ou compatible). Les caractéristiques de notre méthodologie d’intégration sont valables quelles que soient la taille et la complexité des maquettes numériques initiales, ce qui lui confère un caractère générique. En, effet notre méthodologie peut être facilement transposée à d’autres secteurs industriels (aéronautique, ferroviaire, constructions navales, machines complexes, etc.), et divers types d’applications comme la maintenance industrielle, la formation, l’ergonomie, etc.

Un autre aspect original de nos travaux réside dans une intégration simple et ouverte d’un modèle biomécanique humain. Cette intégration est basée sur l’utilisation de la librairie open source Cal3D. Notre approche repose également sur le développement d’une plate-forme de réalité virtuelle multimodale pertinente et efficiente. Ainsi, après une étude des plate-formes existantes, nous avons mis en oeuvre une configuration visuo-haptique non intrusive, basée sur une interface visuelle de grande taille (mur immersif), une interface haptique à câbles (*SPIDAR*) et un système de capture de mouvement (*MOCAP*) à base de caméras infrarouges. Une batterie de stimulateurs vibro-tactiles a également été développée pour renforcer le réalisme des simulations.

Notre procédure d’intégration a été validée à travers le développement de différentes simulations temps-réel, utilisant des maquettes et prototypes virtuels complexes issus du bureau d’études de Valeo Lighting Systems (Angers). Nous avons en particulier analysé la fluidité de ces simulations via l’évolution de la fréquence de rafraîchissement des images.

Enfin, un autre aspect original de nos travaux concerne l'étude de la performance humaine lors de tâches impliquant les maquettes et prototypes virtuels industriels. En effet, plusieurs configurations de plate-formes ont été proposées dans le cadre de divers travaux de recherche sur le prototypage virtuel, mais à ce jour très peu ont été validées à travers des campagnes rigoureuses d'évaluations de performances. Dans ce contexte, nous avons proposé et mené une série cohérente et progressive d'expérimentations permettant d'évaluer la pertinence et l'influence de différentes modalités sensorielles (visuelle, sonore, vibro-tactile, et kinesthésique) sur la performance humaine. Notre objectif était d'identifier la pertinence et l'efficacité de ces retours d'information pour différentes configurations matérielles et différents types de tâches liées à l'accessibilité, à l'extraction et à la manipulation de lampes dans leur environnement (échelle 1 : 1). Les résultats de ces expérimentations ont indiqué un effet significatif des retours sensoriels testés.

La substitution du retour d'effort par des retours visuel, sonore et vibro-tactile a permis d'aboutir à des performances intéressantes. D'autre part, les informations recueillies via des questionnaires et pendant l'exécution des tâches, ont permis d'identifier certaines limites de notre plate-forme et des retours sensoriels proposés.

Les perspectives de notre travail sont relativement nombreuses, tant au niveau de la recherche qu'au niveau applicatif. En effet, notre méthodologie de transformation de maquettes numériques peut être appliquée dans différents secteurs industriels, tels que l'aéronautique, la construction navale, la conception de machines spéciales, etc. Ce qui ouvre des perspectives de valorisation intéressantes pour notre laboratoire. La plate-forme de réalité virtuelle que nous avons développée a déjà été intégrée à différents projets de recherche et contrats industriels. Enfin, les résultats des expérimentations que nous avons menées vont nous permettre de développer des techniques d'interaction multimodales efficaces pour différents types d'applications nécessitant un retour haptique.

Au niveau scientifique, nos travaux vont être enrichis par un système d'aide à la décision permettant d'aider l'opérateur dans des tâches de manipulation d'objets et d'aménagement d'espaces sous contraintes. Dans ce contexte, des techniques de programmation par contraintes, basées sur l'utilisation de différents solveurs, vont être développées.

Annexe A

Procédures de calibration

Dans cette annexe, nous présentons les méthodes de calibration des systèmes de capture de mouvement. La première est relative au *SPIDAR* et la deuxième concerne le système de capture de mouvement par caméras infrarouges.

A.1 Autocalibration du SPIDAR

Nous proposons une méthode d'autocalibration du *SPIDAR*, c'est-à-dire sans utilisation de source de mesure externe. Cette méthode repose sur les hypothèses suivantes :

- les paramètres de calibration sont les positions de chaque moteur,
- la longueur exacte de chaque câble est connue à tout instant,
- les câbles sont assez longs pour atteindre chaque moteur,
- le point concourant des câbles est considéré ponctuel.

Nous n'avons pas la garantie que les moteurs soient exactement placés aux sommets d'un cube, il est donc nécessaire, pour calibrer le *SPIDAR*, de définir les positions et les orientations d'un repère absolu indépendant. Celui-ci est illustré sur la **figure A.1**.

L'origine de ce nouveau repère est confondue avec le *Moteur4*. Le vecteur v est porté par l'axe passant par les deux moteurs *Moteur4* - *Moteur2* et le plan des deux vecteurs v - w est défini par la position des trois moteurs *Moteur4* - *Moteur2* - *Moteur7*.

Selon les précédentes relations, la position de chaque moteur peut être définie par :

$$\text{Moteur2} : \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 \\ 0 \end{pmatrix} \text{Moteur4} : \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{Moteur5} : \begin{pmatrix} u_5 \\ v_5 \\ w_5 \end{pmatrix} \text{Moteur7} : \begin{pmatrix} 0 \\ v_7 \\ w_7 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

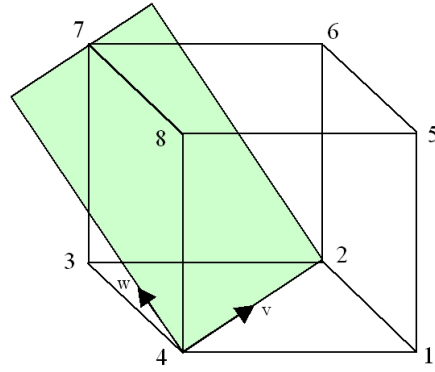


FIGURE A.1 – Position et orientation du repère absolu utilisé dans la méthode de calibration

La première phase du processus de calibration commence avec le positionnement du point concourant des câbles à quatre points appelés "positions de référence". A partir de ces positions de référence, nous obtenons les longueurs de trois câbles pour chaque moteur :

- position 1 (*Moteur5*) donne l_{45} , l_{25} et l_{57} ,
- position 2 (*Moteur4*) donne l_{42} , l_{47} et l_{45} ,
- position 3 (*Moteur2*) donne l_{42} , l_{25} et l_{27} ,
- position 4 (*Moteur7*) donne l_{47} , l_{27} et l_{57} ,

où l_{ij} est la distance entre *Moteur i* et *Moteur j*. Ces longueurs fournissent le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{42}^2 = v_2^2 \\ l_{47}^2 = v_7^2 + w_7^2 \\ l_{45}^2 = u_5^2 + v_5^2 + w_5^2 \\ l_{27}^2 = (y_7 - v_2)^2 + w_7^2 \\ l_{25}^2 = u_5^2 + (v_5 - v_2)^2 + w_5^2 \\ l_{75}^2 = u_5^2 + (v_7 - v_5)^2 + (w_7 - w_5)^2 \end{array} \right. \quad (\text{A.2})$$

où v_2 , v_7 , w_7 , u_5 , v_5 et w_5 sont les six paramètres de calibration. Le système d'équations (A.2) peut être résolu. Le *SPIDAR* peut donc être calibré sans outil de mesure externe, par une méthode de calibration simple. De plus, notons que : (i) si la position et l'orientation de tous les moteurs sont connues dans un repère indépendant, il est facile, par changement de repère, de transférer la position de chaque moteur dans un autre repère (par exemple, le repère cubique définissant l'espace de travail du SPIDAR) et (ii) si une plus grande précision est nécessaire,

la méthode des moindres carrés peut être utilisée (chaque longueur est mesurée au moins deux fois : l_{45} est donnée par les positions 1 et 2).

A.2 Calibration du système MOCAP

Avant de réaliser une session de capture, le système *3D Motion Captor* a besoin d'obtenir des informations sur la position des caméras infrarouges. Le processus pour obtenir ces informations constitue la calibration. Une calibration unique est nécessaire et suffisante mais les caméras étant très sensibles et leur position et orientation pouvant facilement varier, une autre calibration peut se révéler nécessaire. Pour réaliser cette calibration, une barre de calibration est exigée (**Figure A.2(a)**). Il existe trois types de calibration :

- calibration complète,
- re-calibration,
- test de calibration.

A.2.1 Calibration complète

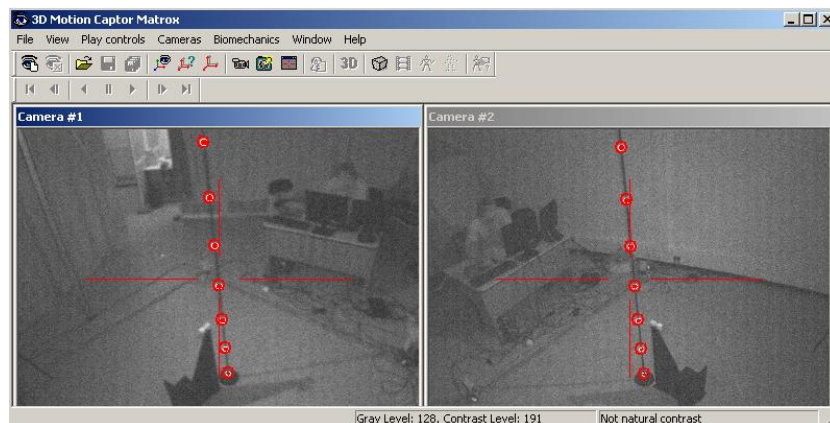
La calibration complète est uniquement nécessaire après la première installation du système de capture ou bien dans le cas où une ou plusieurs caméras auraient été déplacées (déplacement relatif supérieur à 50 cm entre les caméras). Le processus de calibration consiste à positionner la barre de calibration en différents points de la zone de capture. La localisation de ces points ne détermine pas la précision de la calibration. L'essentiel est que ceux-ci soient répartis régulièrement dans la zone de capture. Il est important de prendre en compte que la capture sera réalisée à l'intérieur de la zone définie par ces points. Par conséquent, plus celle-ci est grande, plus l'espace de travail sera grand. Selon le nombre de caméras installées, le nombre de points où placer la barre de calibration varie. Notre système possède 2 caméras et 14 points sont nécessaires (**Figure A.2(b)**).

A.2.2 Re-calibration

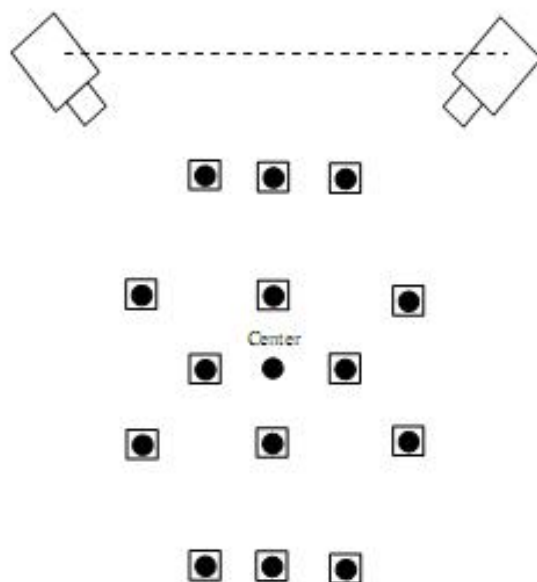
La re-calibration est un processus de calibration simplifié. Celle-ci est nécessaire quand le système est légèrement dérégulé (quand par exemple les caméras ont été légèrement déplacées). Le processus de re-calibration consiste à placer la barre de calibration en un seul point pour chacune des caméras.

A.2.3 Test de calibration

Le test de calibration permet de vérifier que le système est correctement calibré.



(a) Barre de calibration



(b) 14 points de calibration

FIGURE A.2 – Calibration du système de capture de mouvement *3D Motion Captor*.

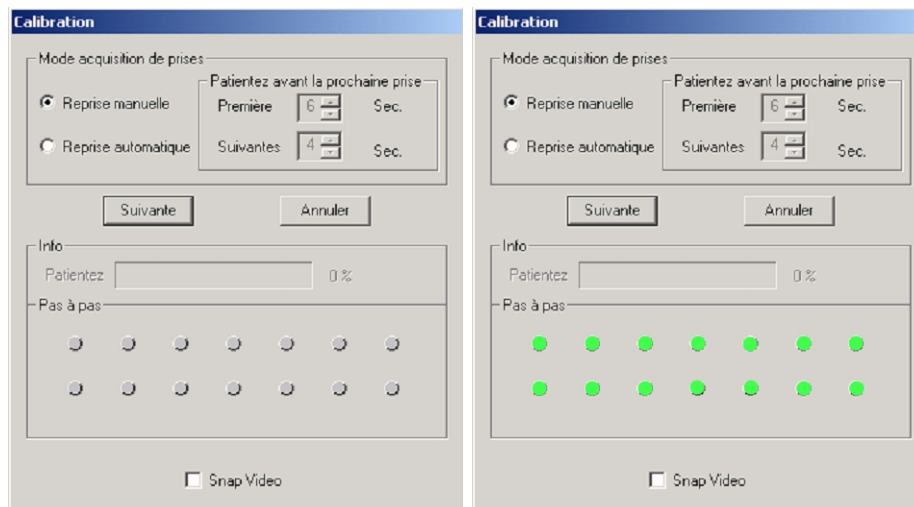
A.3 Calibration avec la barre de calibration

A.3.1 Processus de calibration

Lorsque la calibration commence, nous plaçons aux différents points décrits précédemment la barre de calibration. La **figure A.3** illustre le cas de 9 points correctement calibrés. La **figure A.4(a)** et la **figure A.4(b)** présentent respectivement les états initial et final de calibration.



FIGURE A.3 – Message de succès lors du test de calibration.



(a) Etat initial de la calibration.

(b) Etat final de la calibration.

FIGURE A.4 – Etat de chaque point pendant la calibration du système de capture de mouvement *3D Motion Captor*.

A.3.2 Processus de re-calibration

Le processus de re-calibration permet de calibrer le système de façon plus simple et plus rapide. Cette opération peut être appliquée à partir du moment où les caméras ont très peu bougé depuis la dernière calibration complète du système. Le processus de re-calibration est similaire au processus complet mais beaucoup plus rapide (seulement 6 points).

A.3.3 Test de calibration

Il est possible que pour une raison quelconque une des caméras ait été déplacée après le processus de calibration complète. Pour s'en assurer, on effectue un test de calibration qui consiste à mettre la barre de calibration au centre de l'espace de travail du système et lancer le logiciel de test de calibration.

Annexe B

Précision des capteurs de mouvement

Dans cette annexe, nous analysons la précision en position des systèmes de capture de mouvement intégrés à la plate-forme PREWISE. Nous présentons dans un premier temps, les données relatives au *SPIDAR*, puis nous nous intéressons au système de capture de mouvement électromagnétique *PatriotTM*. Enfin nous terminons par l'analyse de la précision du système de capture de mouvement par caméras infrarouges *3D Motion Captor*.

B.1 Précision en position du SPIDAR

Le centre du repère de l'espace haptique du *SPIDAR* correspond au centre du cube aux sommets duquel sont positionnés les moteurs. Les mesures de positions que nous avons effectuées se situent dans l'intervalle $[-1m, 1m]$ pour les trois axes x , y et z . La **figure B.1** illustre les erreurs de position mesurées en fonction de la distance entre le point concourant des câbles et le centre géométrique du cube pour l'axe x . Pour les axes y et z , les erreurs mesurées sont du même ordre de grandeur. Pour la mesure de ces données, nous avons placé un mètre étalon selon chaque axe (x , y , et z) dans l'intervalle $[-1, 0]$, puis dans l'intervalle $[0, 1]$. On remarque sur la figure que l'erreur de position atteint environ 0.33cm à une distance de 30cm du centre du repère, et d'environ 1.5cm à une distance de 100cm. Les résultats indiquent donc que la précision en position du *SPIDAR* n'est pas suffisante dans le contexte de notre étude. Nous avons donc essayé d'intégrer un autre système de capture de mouvement.

B.2 Précision en position du *PatriotTM*

L'émetteur du système de capture de mouvement électromagnétique *PatriotTM* a été placé au centre du cube du *SPIDAR*. Nous avons mesuré la position de la

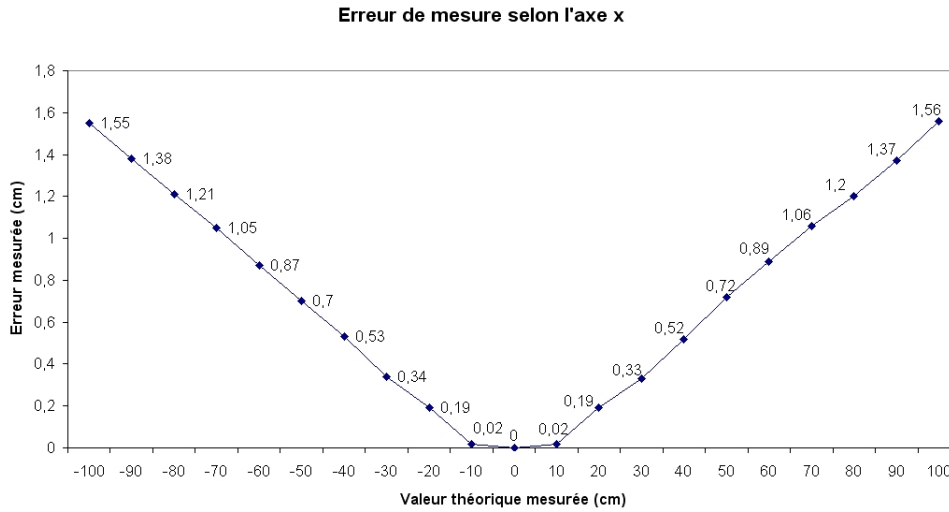


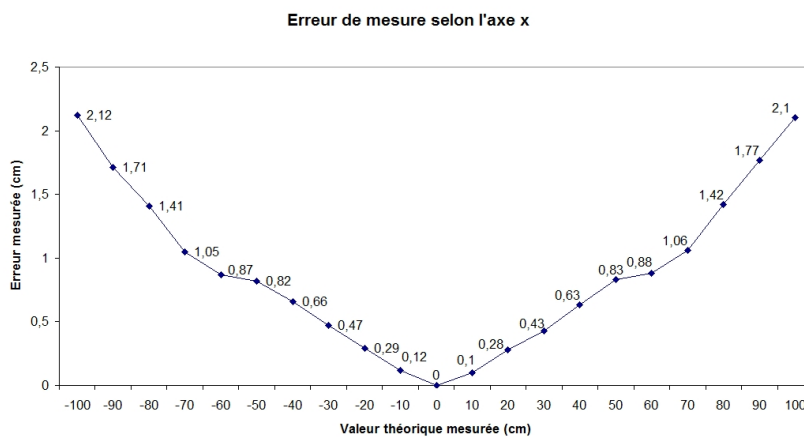
FIGURE B.1 – Erreurs de position du *SPIDAR* mesurées selon l'axe x.

main droite dans l'intervalle $[-1, 1]$ de chaque axe. Comme précédemment, nous avons disposé un mètre étalon selon chaque axe (x, y, et z), dans l'intervalle $[-1, 0]$ puis dans l'intervalle $[0, 1]$. La **figure B.2** illustre l'erreur en position mesurée en fonction de la distance par rapport au centre de l'espace de travail pour tous les axes x, y et z. On définit alors l'erreur de position selon chaque axe. On remarque par exemple que l'erreur de position atteint environ 0.45cm pour une distance mesurée de 30cm et d'environ 2.11cm pour une distance mesurée de 100cm selon l'axe x. Nous n'avons pas jugé utile dans ce cas, de préciser l'erreur angulaire. Ainsi, l'utilisation des fonctionnalités du *PatriotTM* pour récupérer les positions dans l'espace peut se justifier, au même titre que le *SPIDAR*, lorsque la tâche considérée ne nécessite pas une mesure précise des positions. Notre problématique nécessitant une précision de l'ordre du millimètre dans un environnement virtuel à échelle 1:1, nous avons donc travaillé à l'intégration d'un autre système de capture de mouvement beaucoup plus précis : le système de capture par caméras infrarouges *3D Motion Captor*.

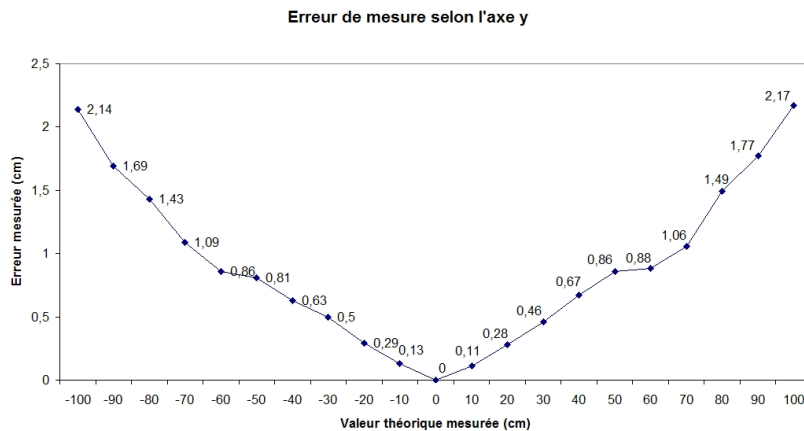
B.3 Précision en position du *3D Motion Captor*

La **figure 4.8** représente l'intégration de deux caméras infrarouges sur la plate-forme PREWISE. Les caméras sont positionnées de façon à couvrir un champ maximum de l'espace de manipulation de l'opérateur placé devant l'écran. Le système permet d'effectuer une capture de mouvements en temps réel. Ceci est crucial pour la synchronisation des informations virtuelles et réelles, en termes de précision des positions et des orientations. Le processus de calibration du système de capture par caméras infrarouges est constitué de deux étapes :

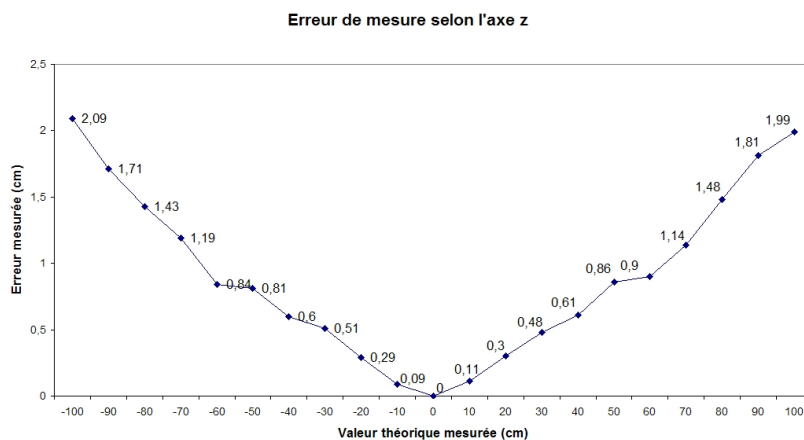
- le placement des réflecteurs ou marqueurs infrarouges (il est nécessaire de



(a)



(b)



(c)

FIGURE B.2 – Erreurs de position du *PatriotTM* mesurées (a) selon l'axe x, (b) selon l'axe y et (c) selon l'axe z .

- disposer un ensemble de marqueurs sur l'acteur choisi, parmi de nombreuses configurations disponibles),
- la capture de mouvement en elle-même.

Notre problématique nous a conduit à animer en temps-réel, via le gant de données *5DT Data Glove14* ddl, un avatar tronqué constitué d'un avant-bras et d'une main dont les mouvements sont mesurés par le système *3D Motion Captor*. En sélectionnant une configuration pertinente pour le positionnement des marqueurs et après une phase de reconnaissance du modèle sélectionné, il est possible de recueillir toutes les informations concernant les positions et les orientations des segments qui constituent le modèle bio-mécanique servant à orienter les modèles 3D. Nous obtenons une cohérence entre l'acteur réel et l'avatar de l'opérateur.

La **figure B.3** représente l'erreur mesurée, en fonction de la distance du trièdre permettant de récupérer la position et l'orientation d'une main par rapport au centre de l'espace de travail, pour l'axe x. Pour ce faire, nous avons disposé un mètre étalon sur cet axe dans l'intervalle $[-1, 0]$ puis dans l'intervalle $[0, 1]$. La position de la main dépend de la position de trois marqueurs avec lesquels on peut déterminer l'orientation. On remarque par exemple que l'erreur de position atteint environ 0.1cm pour une distance mesurée de 10cm et d'environ 0.5cm pour une distance mesurée de 100cm. Les résultats des erreurs de position mesurées selon les axes y et z ne sont pas représentés parce que ces erreurs sont sensiblement identiques à celles relatives à l'axe x. En effet, l'erreur est une fonction linéaire de la distance mesurée. Sur le graphique, l'axe x représente la valeur théorique mesurée et l'axe y l'erreur associée :

$$y = 0.005x \quad (\text{B.1})$$

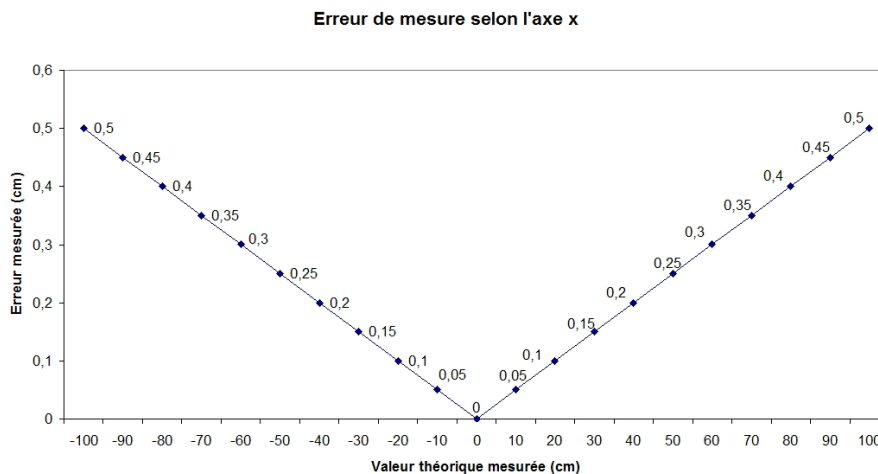


FIGURE B.3 – Erreurs de position mesurées du système *3D Motion Captor* selon l'axe x.

Annexe C

Evolution de la fréquence de rafraîchissement

Dans cette annexe, nous présentons l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours sensoriels sur la fréquence de rafraîchissement des images lors de collisions répétées avec les maquettes virtuelles lors de simulations présentées au chapitre 5.

C.1 Environnement de manipulation

Nous avons mesuré l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours sensoriels sur la fréquence de rafraîchissement des images lors de collisions répétées avec la maquette virtuelle illustrée à la **figure 4.12**.

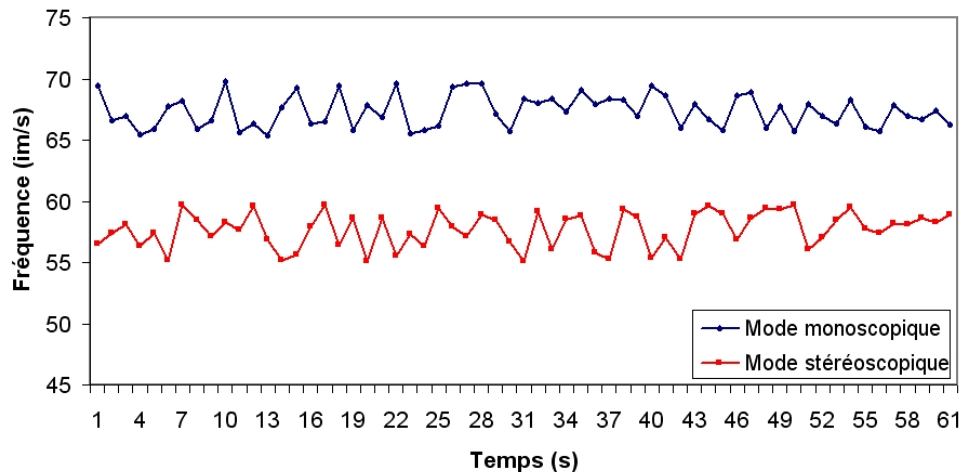


FIGURE C.1 – Evolution de la fréquence de rafraîchissement des images en mode monoscopique et en mode stéréoscopique en l'absence de collision et de retour sensoriel.

La **figure C.1** illustre l'évolution de cette fréquence, en l'absence de collision (référence) avec la maquette virtuelle. Nous observons qu'elle varie entre 65.38 et 69.77 Ips en mode monoscopique avec une moyenne de 67.35 et entre 55.06 et 59.69 Ips en mode stéréoscopique pour une moyenne de 57.67. Les **figures C.2, C.3, C.4** illustrent respectivement l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours visuel, sonore, et vibrotactile sur la fréquence de rafraîchissement des images.

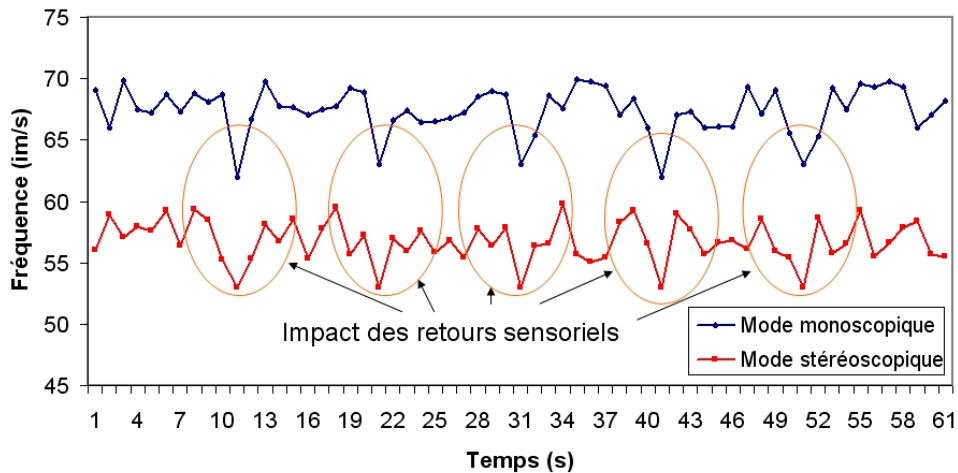


FIGURE C.2 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour visuel sur la fréquence de rafraîchissement des images.

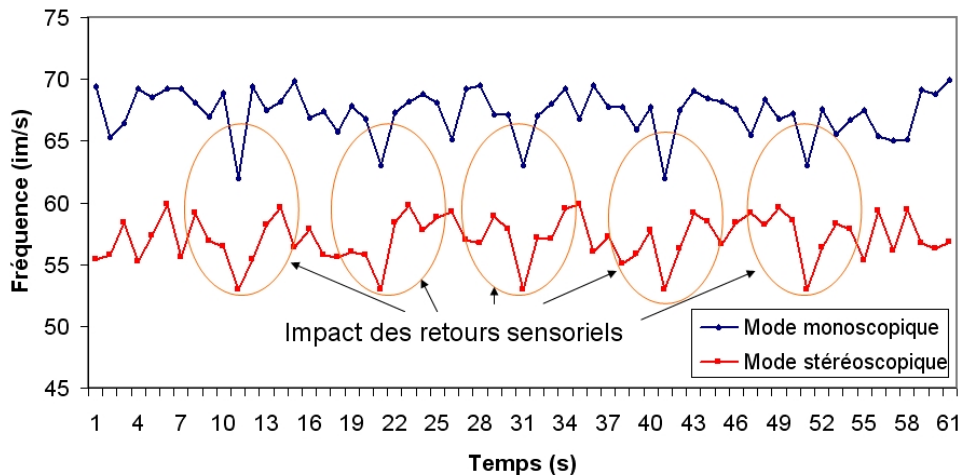


FIGURE C.3 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour sonore sur la fréquence de rafraîchissement des images.

Nous observons, en présence d'un retour visuel, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 62 et 69.90 Ips en mode monoscopique et entre 53 et 59.82 Ips

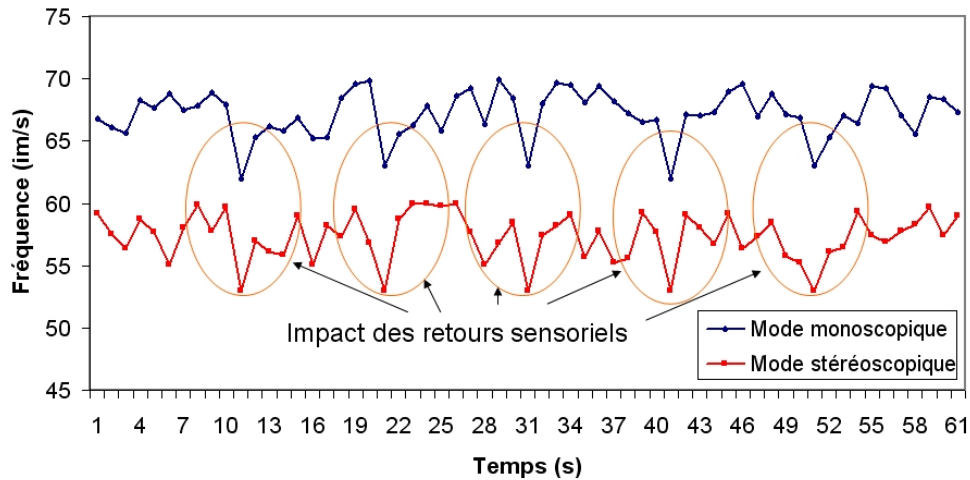


FIGURE C.4 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour tactile sur la fréquence de rafraîchissement des images.

en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.35 Ips en mode monoscopique et 4.67 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de la courbe de référence. Cela reste très acceptable et n'influe pas de manière significative la fluidité de la simulation. Nous observons également, en présence d'un retour sonore, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 62 et 69.91 Ips en mode monoscopique et entre 53 et 59.88 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.35 Ips en mode monoscopique et 4.67 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de la courbe de référence. De la même manière, cela reste très acceptable et n'influe pas de manière significative la fluidité de la simulation. Nous observons également, en présence d'un retour vibrotactile, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 62 et 69.91 Ips en mode monoscopique et entre 53 et 59.99 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.35 Ips en mode monoscopique et 4.67 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de la courbe de référence, ce qui reste très acceptable et n'influe pas de manière significative la fluidité de la simulation.

C.2 Interaction avec une maquette complexe

Nous avons analysé l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours sensoriels sur la fréquence de rafraîchissement des images lors de collisions répétées avec la maquette virtuelle illustrée à la **figure 4.15**.

La **figure C.5** illustre l'évolution de cette fréquence, en l'absence de collision (référence) avec la maquette virtuelle. Nous observons qu'elle varie entre 55.15

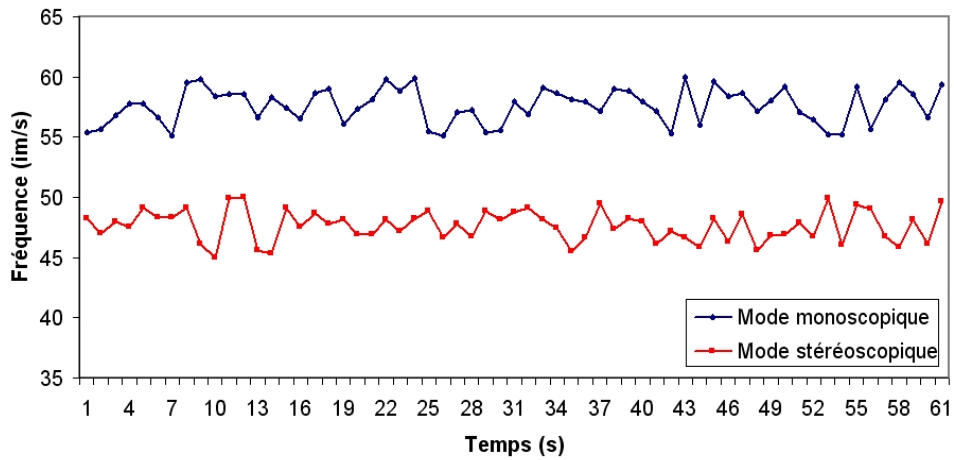


FIGURE C.5 – Evolution de la fréquence de rafraîchissement des images en mode monoscopique et en mode stéréoscopique en l'absence de collision et retours sensoriels.

et 59.99 Ips en mode monoscopique avec une moyenne de 57.61 et entre 45.01 et 49.96 Ips en mode stéréoscopique avec une moyenne de 47.63. Les **figures C.6, C.7 et C.8** illustrent respectivement l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours visuel, sonore, et vibrotactile sur la fréquence de rafraîchissement des images.

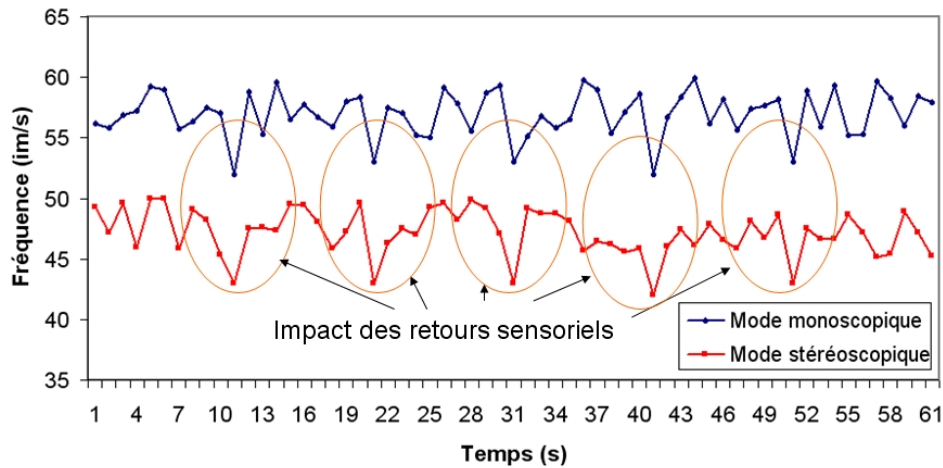


FIGURE C.6 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour visuel sur la fréquence de rafraîchissement des images.

Nous observons, en présence d'un retour visuel, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 52 et 59.90 Ips en mode monoscopique et entre 42 et 49.94 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.61 Ips en mode monoscopique et 5.63 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de

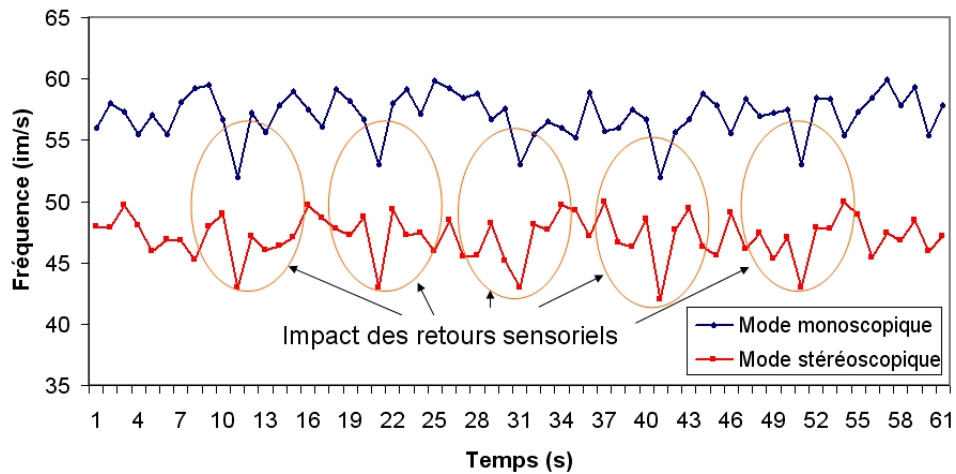


FIGURE C.7 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour sonore sur la fréquence de rafraîchissement des images.

la courbe de référence. Ces résultats sont très acceptables et l'influence de la surcharge de calcul due aux collisions n'influe pas de manière significative la fluidité de la simulation. Nous observons également, en présence d'un retour sonore, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 52 et 59.89 Ips en mode monoscopique et entre 42 et 49.96 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.61 Ips en mode monoscopique et 5.63 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de la courbe de référence. Ces résultats sont similaires à ceux observés en présence du retour visuel et l'influence de la surcharge de calcul due aux collisions n'influe pas de manière significative la fluidité de la simulation. Nous observons également, en présence d'un retour vibrotactile, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 52 et 59.76 Ips en mode monoscopique et entre 42 et 49.93 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.61 Ips en mode monoscopique et 5.63 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne. Ces résultats sont similaires à ceux observés en présence des retours visuel et sonore.

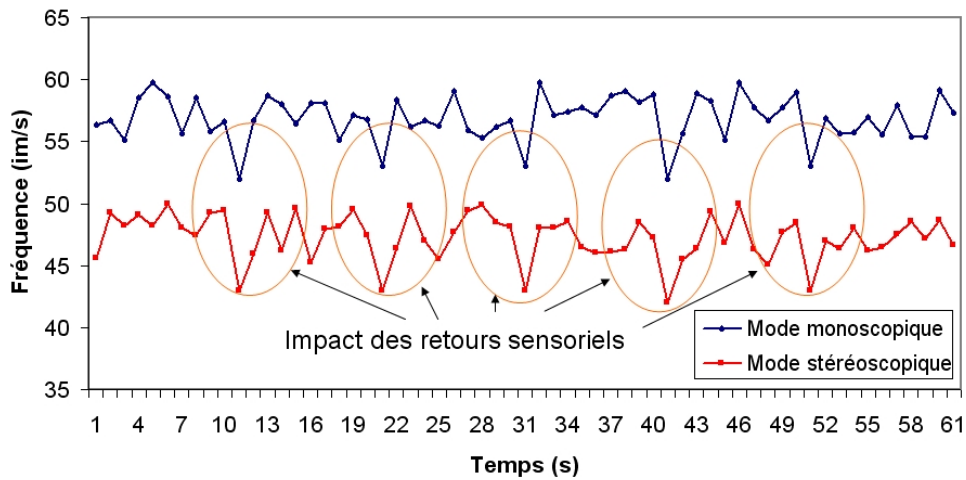


FIGURE C.8 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour tactile sur la fréquence de rafraîchissement des images.

C.3 Interaction en environnement moteur

Nous avons analysé l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours sensoriels sur la fréquence de rafraîchissement des images lors de collisions répétées avec la maquette virtuelle illustrée à la **figure 4.15**.

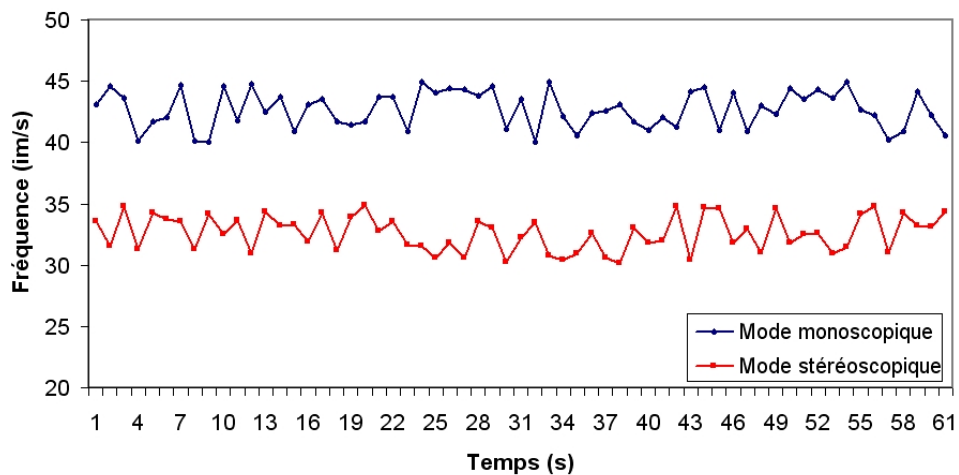


FIGURE C.9 – Evolution de la fréquence de rafraîchissement des images en mode monoscopique et en mode stéréoscopique en l'absence de collision et de retour sensoriel.

La **figure C.9** illustre l'évolution de cette fréquence, en l'absence de collision (référence) avec la maquette virtuelle. Nous observons qu'elle varie entre 40.01 et 44.93 Ips en mode monoscopique avec une moyenne de 42.68 et entre 30.14 et 34.91 Ips en mode stéréoscopique avec une moyenne de 32.6 Ips.

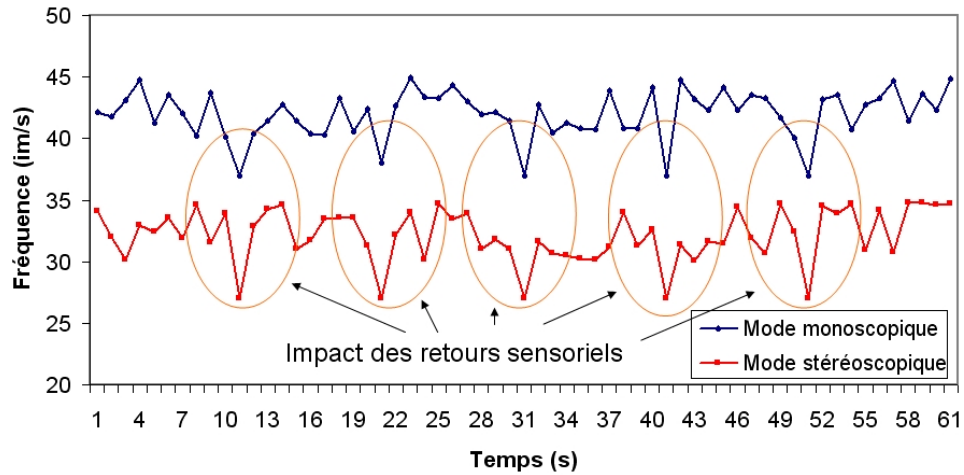


FIGURE C.10 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour visuel sur la fréquence de rafraîchissement des images.

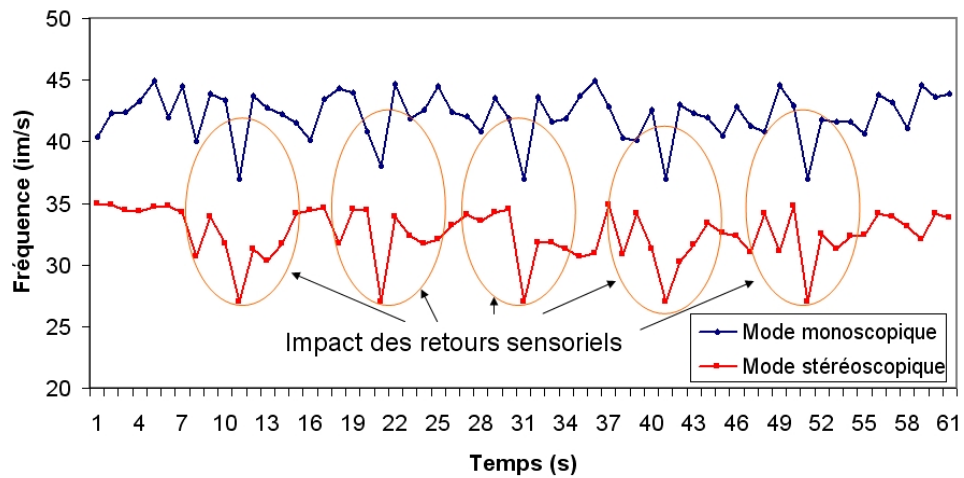


FIGURE C.11 – Influence cumulée de la surcharge de calcul et du retour d'effort sur la fréquence de rafraîchissement des images.

Les **figures C.10 et C.11** illustrent respectivement l'influence cumulée (i) de l'impact de la surcharge de calcul relative aux collisions et (ii) des retours visuel et d'effort sur la fréquence de rafraîchissement des images. Nous observons, en présence d'un retour visuel, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 37 et 44.92 Ips en mode monoscopique et entre 27 et 34.79 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.68 Ips en mode monoscopique et 5.6 Ips en mode stéréoscopique en comparaison de la valeur moyenne de la courbe de référence. En mode monoscopique, certains utilisateurs avertis peuvent ressentir cette chute de fréquence de rafraîchissement au moment de la collision.

Ce sentiment est renforcé en mode stéréoscopique. La chute de fréquence de rafraîchissement engendre une désynchronisation entre les mouvements réels et les mouvements de l'avatar. Cette latence n'est pas acceptable dans une simulation temps-réel. Nous observons également, en présence d'un retour d'effort, que la fréquence de rafraîchissement varie entre 37 et 44.91 Ips en mode monoscopique et entre 27 et 34.98 Ips en mode stéréoscopique. Lors de collisions, nous avons observé une chute de la fréquence de rafraîchissement qui pouvait atteindre 5.68 Ips en mode monoscopique et 5.6 Ips en mode stéréoscopique. Les résultats sont similaires à ceux observés en présence d'un retour visuel et certains utilisateurs avertis ressentent lors de la collision, la diminution de la chute de fréquence de rafraîchissement qui engendre une désynchronisation entre les mouvements réels et les mouvements de l'avatar.

Bibliographie

- [1] <http://www.mechdyne.com>.
- [2] <http://www.sensable.com>.
- [3] <http://www.haption.com>.
- [4] <http://www.immersion.com>.
- [5] <http://www.sascube.com>.
- [6] <http://gna.org/projects/cal3d/>.
- [7] <http://www.Polhemus.com/>.
- [8] M. Akamatsu and I.S. MacKenzie. Movement characteristics using a mouse with tactile and force feedback. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 45, pp. 483-493, 1996.
- [9] Mark R. Cutkosky Allison M. Okamura and Jack Tigh Dennerlein. Reality based models for vibrations feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Volume 6, Issue 3, Sep 2001, pp. 245-252, 2001.
- [10] K. W. Arthur. Effects of field of view on performance with head-mounted displays. PhD University of North Carolina, Chapel Hill, 2000.
- [11] F. Barbagli, A. Formaglio, M. Franzini, A. Giannitrapani, and D. Prattichizzo. An experimental study of the limitations of mobile haptic interfaces. Chapter in *Experimental Robotics IX - STAR* (Springer Tracts on Advanced Robotics), Springer-Verlag, 2004.
- [12] W. Barfield, C. Rosenberg, and W.A. Lotens. Augmented-reality display. In *Virtual Environments and Advanced Interface Design*, pages 542-575, 1995.
- [13] A Bejczy and O. Paine. Manual control of manipulator force and torques using graphics display. In *Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, October, 1982.
- [14] M. Bergamasco. The glad-in-art project. In *Proceedings of Imagina'92 Conference*, 1992.
- [15] L. Birglen, N. Pouliot C. Gosselin, B. Monsarrat, and T. Laliberté. Shade, a new 3-dof haptic device. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, N° 2, 2002.

- [16] D. Borro, J. Savall, A. Amundarain, J.J. Gil, A. Garcia-Alonso, and L. Mathey. A large haptic device for aircraft engine maintainability. *IEEE Computer Graphics Applications*, Vol. 24, N°6, pp. 70-74, 1996.
- [17] C. W. Borst and A. P. Indugula. Realistic virtual grasping. In *IEEE Conference 2005 on Virtual Reality*, pages 91–98, 2005.
- [18] L. Bouguila, M. Ishii, and M. Sato. Scaleable spidar : A haptic interface for human-scale virtual environments. In *Haptic Human-Computer Interaction : First International Workshop, Glasgow, Vol. 2058*, pages 182–193, Glasgow, UK, 2000.
- [19] L. Bouguila, M. Ishii, and M. Sato. What impact does the haptic-stereo integration have on depth perception in stereographics virtual environment ? a preliminary study. *Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, 2000.
- [20] M. Bouzit. Conception et mise en oeuvre d'un gant de données à retour d'effort pour la télémanipulation d'objets virtuels et réels. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 1998.
- [21] M. Bouzit, G. Burdea, G. Popescu, and R. Boian. The rutgers master ii - new design force-feedback glove. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2002.
- [22] D.A. Bowman, E. Kruijff, J. J. Laviola Jr, and I. Poupyrev. *3D User Interfaces, Theory and Practice*. Addison Wesley, 2004.
- [23] E. Brau. Contribution à l'étude d'interfaces portables à retour d'efforts pour la réalité virtuelle. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [24] J. Brederson, M.Ikits, C. Johnson, and C. Hansen. The visual haptic workbench. In *Proceedings of PHANToM users group workshop*, 2000.
- [25] H. Böse, J. Berkemeier, and A. Trendler. Haptic system based on electrorheological fluid. In *Proceedings of the ACTUATOR 2000 Conference, Bremen, Germany*, 2000.
- [26] G. Burdea. *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley and Sons, Inc, New York, NY, USA, 1996.
- [27] G. Burdea and Ph. Coiffet. *La réalité virtuelle*. Editions Hermès, Paris, France, 1994.
- [28] G. Burdea, D. Gomez, N. Langrana, E. Roskos, and P. Richard. Virtual reality graphics simulation with force feedback. *International Journal of Computer Simulation*, Special Issue on Advances in Modeling and Simulation Methodologies, pp. 287-303, 1995.
- [29] G. Burdea and J. Zhuang. Actuator system for providing force feedback to a dextrous master glove. US Patent 5,143,505, September, 1992.
- [30] D. Chamaret and P. Richard. Multimodal prop-based interaction with virtual mock-up : Cad model integration and human performance evaluation. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*.

- [31] D. Chamaret, P. Richard, and S. Ullah. Large-scale dexterous haptic interaction with virtual mock-ups : Methodology and human performance. In *Proceedings of the International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO09)*.
- [32] D. Chamaret, S. Ullah, P. Richard, and M. Naud. Integration and evaluation of haptic feedbacks : from cad models to virtual prototyping. *IJIDEM*, 2010.
- [33] D. Constantinescu, S. E. Saludean, and E. A. Croft. Haptic rendering of rigid body collisions. 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004.
- [34] K. M. Corker, A. K. Bejczy, and B. Rappaport. Force/torque display for space teleoperation control experiments and evaluation. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Manual Control*, pages 465–477, Los Angeles, CA, October 15-17, 2003.
- [35] Physical Optics Corporation. Optical see-through hmd. <http://www.poc.com/>.
- [36] C. Cruz-Neira, D.J. Sandin, and T.A. DeFanti. Surround-screen projection-based virtual reality : The design and implementation of the cave. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH'93*.
- [37] P. Cutt. Tactile displays : Adding the sense of touch to virtual environments. In *Proceedings of Virtual Reality Systems'93 Conference*.
- [38] B. Delaunay. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh Estestvennykh Nauk, Vol. 7, pp. 793-800, 1934.
- [39] I. Diaz, J. Hernantes, I. Mansa, A. Lozano, D. Borro, J.J. Gil, and E. Sanchez. Influence of multisensory feedback on haptic accessibility tasks. *Virtual reality*, Vol. 10, N°1, pp. 31-40, 2006.
- [40] G. Drieux, F. Guillaume, J.C. Léon, and N. Chevassus. Samira : a platform for virtual maintenance simulation with haptic feedback incorporating a model preparation process. In *Proceedings of Virtual Concept 2005*, 2005.
- [41] E.K. Edwards, J.P. Rolland, and K.P. Keller. Video see-through design for merging of real and virtual environments. In *VRAIS*, 1993.
- [42] Elumens. Visiodome. <http://www.elumens.com>.
- [43] K. Erleben. Module based design for rigid body simulations. Technical report, University of Copenhagen, Denmark, 2002.
- [44] M. Kawakami H et Kajimoto et M. Inami et S. Tachi. Smarttouch - augmentation of skin sensation with electrocutaneous displays. *Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2003.
- [45] Kino H. et Kawamura S.a. Development of a serial link structure/parallel wire system of a force display. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, 2002.
- [46] Y. Ikei et K.Wakamatsu et S. Fukud. mage data transformation for tactile texture displays. *Virtual Reality Annual International Symposium*, 1998.

- [47] M. Enriquez et O. Afonin et B. Yager et K. Maclean. A pneumatic tactile alerting system for the driving environment. In *ACM International Conference Proceeding Series, Vol. 15*, 2001.
- [48] D.G. Caldwell et O. Kocak et U. Andersen. Multi-armed dexterous manipulator operation using glove/exoskeleton control and sensory feedback. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1995.
- [49] W. R. Ferrel. Delayed force feedback. *HumanFactors*, pp. 449-455, 1966.
- [50] A. Frisoli, F. Rocchi, S. Marcheschi, F. Salsedo, and F. Bergamasco. A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005.
- [51] P. Fuchs. *Le Traité de la Réalité Virtuelle, vol. 2, 3ème édition*. Ecole des Mines de Paris, Les Presses, 2006.
- [52] P. Fuchs, G. Moreau, and J.P. Papin. *Le Traité de la Réalité Virtuelle, 1ère édition*. Ecole des Mines de Paris, Les Presses, 2001.
- [53] P. Garrec, J.P. Friconneau, and F. Louveau. Virtuouse 6d : A new industrial master arm using innovative ball-screw actuators. In *International Symposium on Robotics*, 2004.
- [54] F. Gosselin. Optimisation des interfaces haptiques : problèmes, méthodes, applications. 17th congrès français de mécanique, 2005.
- [55] F. Gosselin, T. Jouan, J. Brisset, and C. Andriot. A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments. In *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2005, Pisa, Italy*, pages 202–207, 2005.
- [56] B. Grant, A. Hessler, and R.M. Taylor II. Adding force display to a stereoscopic head-tracked projection display. In *Proceedings of IEEE virtual reality annual international symposium*, pages 81–88, Atlanta, GA, USA, 1998.
- [57] A. Gregory, A. Mascarenhas, S. Ehmann, M. Lin, and D. Manocha. Six degree-of-freedom haptic display of polygonal models. IEEE Visualisation, 2000.
- [58] J. Grosjean, J.M. Burkhardt, S. Coquillart, and P. Richard. Evaluation of the command and control cube. In *ICMI'2002, Pittsburgh, USA, IEEE*, 2002.
- [59] S. Hasegawa and M. Sato. Real-time rigid body simulation for haptic interactions based on contact volume of polygonal objects. EUROGRAPHICS, 2004.
- [60] S. Hasegawa, I. Toshiaki, N. Hashimoto, M. Salvati, H. Mitake, Y. Koike, and M. Sato. Human-scale haptic interaction with a reactive virtual human

- in a real-time physics simulator. *ACM Computer in Entertainment*, vol. 4, N°3, 2006.
- [61] V. Hayward. Haptics : A key to fast paced interactivity. International Conference on Machine Automation, Osaka, Japan, 2000.
- [62] V. Hayward. Survey of haptic interface research at mcgill university. In *Workshop in Interactive Multimodal Telepresence Systems, TUM, Munich Germany*, pages 91–98, 2001.
- [63] V. Hayward and O.R Astley. Performance measures for haptic interfaces. 7th International Symposium, 1996.
- [64] V. Hayward and J.M. Cruz-Hernandez. Tactile display device using distributed lateral skin stretch. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, IMECE, 2000.
- [65] P. Heckbert and M. Garland. Multiresolution modeling for fast rendering. In *Proceedings of Graphics interface 94*, pages 43–50, 1994.
- [66] K. Hinckley, R. Pausch, J. Goble, and N. Kassell. Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. CHI, 1994.
- [67] Y. Hirata and M. Sato. 3-dimensional interface device for virtual work space. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992.
- [68] M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige. Hapticgear : The development of a wearable force display system for immersive projection displays. IEEE Virtual Reality Conference, 2001.
- [69] C.H. Ho, C. Basdogan, and M.A. Srinivasan. A ray-based haptic rendering technique for displaying shape and texture of 3d objects in virtual environments. ASME Winter Annual Meeting, 1997.
- [70] J. M. Hollerbach, I.W. Hunter, and J. Ballantyne. A comparative analysis of actuator technologies for robotics. MIT Press Cambridge, MA, USA, pp. 299-342, 1992.
- [71] D. Holz, S. Ullrich, M. Wolter, and T. Kuhlen. Multi-contact grasp interaction for virtual environments. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, Vol. 5, N°7, 2008.
- [72] H. Hoppe. Progressive meshes. *Computer Graphics*, Vol. 30, pp. 99-108, 1996.
- [73] R. Howe. Pin-based tactile shape displays. Journée Scientifique Internationale IRCICA, 2004.
- [74] Y. Hurmuzlu, A. Ephanov, and D. Stoianovici. Evaluating human perception in pneumatically driven haptic interfaces. *Presence*, MIT Press, Vol. 7, N° 3, pp. 290-307, 1998.
- [75] R. Williams II. Cable-suspended haptic interface. *International Journal of Virtual Reality*, vol. 3, N° 3, pp. 13-21, 1998.

- [76] F.X. Inglese, P. Lucidarme, P. Richard, and F.L. Ferrier. Previsé : a human-scale virtual environment with haptic feedback. In *ICINCO 2005, Proceedings of the Second International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pages 140–145, 2005.
- [77] J. Isdale. What is virtual reality ? A homebrew introduction and information resource list from Compuserve Graphic Developers Forum, 1993.
- [78] M. Ishii and M. Sato. A 3d interface device with force feedback : A virtual work space for pick-and-place tasks. In *Proceedings of the Annual International Symposium of Virtual Reality*, 1993.
- [79] M. Ishii and M. Sato. A 3d spatial interface device using tensed strings. *Presence*, Vol. 3, N°1, 1994.
- [80] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and R. Kawamura. Project feelex : Adding haptic surface to graphics. *ACM SIGGRAPH 01*, 2001.
- [81] A. Johnson. Programmable tactile stimulator array system and method of operation. US Patent 5,165,897, 1992.
- [82] D. E. Johnson and P. Willemsen. Six degree-of-freedom haptic rendering of complex polygonal models. *HAPTICS*, 2003.
- [83] S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike, and M. Sato. Tension based 7-dof force-feedback device : Spidar g. *IEEE Virtual Reality Conference*, march 2002.
- [84] W.S. Kim, F. Tendick, and L. Stark. Visual enhancements in pick-and-place tasks : Human operator controlling a simulated cylindrical manipulator. *IEEE J. Robotics and Automation*.
- [85] Y. Sang Kim, J. Lee, S. Lee, and M. Kim. A force reflected exoskeleton-type masterarm for human-robot interaction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, vol. 35, N° 2, 2005.
- [86] Hannaford B. Tyler M. et Stark L. Kim W.S., Ellis S. A quantitative evaluation of perspective and stereoscopic display in three-axis manual tracking tasks. *IEEE Transportation Systems, Man and Cybernetics SMC-17*, 1, pp. 16-72, 1987.
- [87] T. Koyama, I. Yamano, and K. Takemura. Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Switzerland, 2002.
- [88] J. Kramer. Force feedback and textures simulating interface device. US Patent, 1993.
- [89] D. Lampe. Materials database on commercially available electro- and magnetorheological fluids (erf and mrf). <http://www.tu-dresden.de/mwilr/lampe/HAUENG.HTM>, updated on 01/30/1997, 1994.
- [90] J. Lander and C. Hecker. Product review of physics engines, part one : The stress tests. Technical report, http://www.gamecareerguide.com/features/20000913/lander_01.htm, 2000.

- [91] J. Lander and C. Hecker. Product review of physics engines, part two : The rest of the story. Technical report, [http : //www.gamecareerguide.com/features/20000913/lander_01.htm](http://www.gamecareerguide.com/features/20000913/lander_01.htm), 2000.
- [92] E. Larsen, S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha. Fast proximity queries with swept sphere volumes. Technical report, Department of Computer Sciences, UNC Chapel Hill, 1999.
- [93] A. Lécuyer. Contribution to the study of haptic and pseudo-haptic feedbacks and their impact on simulations of assembly/maintenance operations in aeronautics. Ph.D. Dissertation, Université Paris XI Orsay, 2001.
- [94] A. Lécuyer, C. Megard, J.M. Burkhardt, T. Lim, S. Coquillart, P. Coiffet, and L. Graux. The effect of haptic, visual and auditory feedback on an insertion task on a 2-screen workbench. Immersive Projection Technology Symposium, Orlando, 2002.
- [95] A. Lécuyer, P. Mobuchon, C. Megard, J. Perret, C. Andriot, and J.P. Colinet. Homere : a multimodal system for visually impaired people to explore virtual environments. In *Proceedings of the IEEE VR'03*, los Angeles, CA, 2003.
- [96] LIMSI-CNRS. Corsaire : Combinaisons de rendus sensori-moteurs pour l'analyse immersive de résultats. [http : //www.limsi.fr/venise/CoRSAIRE.html](http://www.limsi.fr/venise/CoRSAIRE.html).
- [97] B. Lok, S. Naik, and M. Whitton. Effects of handling real objects and avatar fidelity on cognitive task performance in virtual environments. In *IEEE VR 2003*, pages 95–108, 2003.
- [98] H. Maekawa and J. Hollerbach. Haptic display for object grasping and manipulating in virtual environment. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Belgium, 1998.
- [99] B. Marcus and P. Churchill. Human hand sensing for robotics and teleoperations. Arthur D. Little Technical Report, 1989.
- [100] F. Marcus. What designers need to know about physics, [http : //www.gamasutra.com](http://www.gamasutra.com), 2003.
- [101] T. H. Massie and J. K. Salisbury. The phantom haptic interface : A device for probing virtual objects. ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994.
- [102] M.J. Massimino and T.B. Sheridan. Sensory substitution for force feedback in teleoperation. *Presence*, Vol. 2, N°4, pp. 344-352, 1994.
- [103] C. Mavroidis, C. Pfeiffer, and Y.Bar-Cohen. Controlled compliance haptic interface using electro-rheological fluids. Proceedings of the 2000 SPIE Conference on Electro-Active Polymer Actuators and Devices (EAPAD 2000), SPIE Proc. Vol. 3987, 2000a, pp. 300-310, 2000.
- [104] W. A. McNeely, K. D. Puterbaugh, and J. J. Troy. Six degree-of freedom haptic rendering using voxel sampling. *Computer Graphics (SIGGRAPH 99)*, 1999.

- [105] C. Melchiorri, M. Montanari, and G. Vassura. Control strategies for a defective, wire-based, haptic interface. Proceedings of the first IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997.
- [106] G. J. Monkman. Electrorheological tactile displays. Presence, MIT Press, Vol. 1, N° 2, 1992.
- [107] D. Nahon. Salles immersives et cubes de réalité virtuelle, une première mondiale sur pc : le sas cube. Proceedings of Imagina'02 Conference, 2002.
- [108] Novint. <http://home.novint.com>.
- [109] M. Ortega and S. Coquillart. Prop-based haptic interaction with co-location and immersion : an automotive application. In Proceedings of Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE'05), 2005.
- [110] M. Ortega, S. Redon, and S. Coquillart. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies. In Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Reality (IEEE VR'06), 2006.
- [111] M. Ortega, S. Redon, and S. Coquillart. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties. In IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG journal), 2007.
- [112] M. A. Otaduy and M. C. Lin. Sensation preserving simplification for haptic rendering. ACM Transactions on Graphics, 2003.
- [113] M. Ouh-Young, M. Pique, L. Hughes, N. Srinivasan, and F.P. Brooks. Using a manipulator for force display in molecular docking. In *IEEE Robotics and Automation Conference 3, Philadelphia, USA*, pages 1824–1829, 1988.
- [114] D. Paillot. Gestion de données pour la visualisation de maquettes numériques en environnement immersif. application au design automobile. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2004.
- [115] D. Paillot, F. Mérienne, M. Neveu, and J.P. Frachet. Visualisation de modèles cao dans une application de réalité virtuelle immersive. AFIG, Lyon, France, pp. 9-11, 2002.
- [116] D. Paillot, F. Mérienne, M. Neveu, and S. Thivent. Traitement et gestion de modèles surfaciques pour la revue de projet en immersion virtuelle. Revue Internationale d'Ingénierie Numérique, Vol. 1, pp. 27-50, 2005.
- [117] D. Paillot, F. Mérienne, and S. Thivent. Cad/cae visualization in virtual environment for automotive industry. EGVE 03 : Proceedings of the workshop on virtual environments, pp. 315-316, 2003.
- [118] A. Paljic. Interaction en environnement immersifs et retours d'effort passifs. PhD. Thesis INRIA, 2004.
- [119] A. Paljic, J.-M. Burkhardt, P. Richard, and S. Coquillart. A study of distance of manipulation on the responsive workbench. Immersive Projection Technology Workshop, Orlando, Florida, 2002.

- [120] N. Patrick. Design, construction, and testing of a fingertip tactile display for interaction with virtual and remote environments. Masters Thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1990.
- [121] T. Piantanida, D.K. Boman, and J. Gille. Human perceptual issues and virtual reality. *Virtual Reality Systems*, Vol. 1, N°1, pp. 43-52, 1993.
- [122] M. Pouliquen, Y. Pinczon du Sel, A. Bernard, J. Marsot, and L. Chodorge. Human-computer interactions with motion capture for virtual reality applications. In *Virtual concept 2005*, 2005.
- [123] E. Puppo and R. Scopigno. Simplification, lod and multiresolution principles and applications. *Eurographics 97*, 1997.
- [124] Reachin. Reachin display. <http://www.reachin.se/products/Hardware/>.
- [125] J. Reger. Visually displayed force feedback in delayed and non-delayed bilateral teleoperation. In *SID International Symposium - Digest of Technical Papers*, New Orleans, 1987.
- [126] K.J. Renze and J.H. Olivier. Generalized unstructured decimation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 24-32, 1996.
- [127] P. Richard. Analyse de l'interaction homme-monde virtuel lors de tâches de manipulation d'objets déformables. Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 1996.
- [128] P. Richard, G. Birebent, P. Coiffet, G. Burdea, D. Gomez, and N. Langrana. Effect of frame rate and force feedback on virtual object manipulation. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 5, N°1, pp. 95-108, 1996.
- [129] P. Richard, G. Burdea, and P. Coiffet. Human perceptual issues in virtual environment : Sensory substitution and information redundancy. *Proc. 4th IEEE Int. Work. on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'95)*, Tokyo, Japan, pp. 301-306, 1995.
- [130] P. Richard, G. Burdea, D. Gomez, and Ph. Coiffet. Human performance evaluation of two handle haptic devices in a dextrous virtual telemanipulation task. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'99)*, Vol. 3 pp. 1543-1548, 1999.
- [131] P. Richard, D. Chamaret, F.X. Inglese, P. Lucidarme, and J.L. Ferrier. Human-scale virtual environment for product design : Effect of sensory substitution. *The International Journal of Virtual Reality* Vol. 5(2) pp. 37-44, 2006.
- [132] P. Richard and P. Coiffet. Effect of head movements on egocentric depth perception in virtual environments. *Proceedings of the 6th International Workshop in Virtual Reality*, pp. 22-28, 1998.
- [133] P. Richard and P. Coiffet. Effect of frame rate and force feedback on virtual object manipulation. In *Proc. 8th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'99) Pisa, Italy*, pp. 315-320, 1999.

- [134] P. Richard, P. Coiffet, A. Kheddar, and R. England. A comparison of haptic, visual and auditive force feedback for deformable virtual objects. In *Proceeding of the 4th International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT94)*, pages 49–62, Tokyo, Japan, July 14-15, 1994.
- [135] P. Richard, R. England, A. Kheddar, and P. Coiffet. Dextrous haptic interaction in virtual environments : human performance evaluation. In *Proceedings of the International Conference on Virtual Reality and Prototyping*, pages 127–136, 1999.
- [136] J.C. Schaff and F.L. Thompson. System concept development with virtual prototyping. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, pages 941–947, 1997.
- [137] W.J. Schroeder, J.A. Zarge, and W.E. Lorensen. Decimation of triangle meshes. *ACM SIGGRAPH 92*, Chicago, pp. 65-70, 1992.
- [138] Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Csiros. <http://www.csiro.au>.
- [139] A. Seugling and M. Rölin. Evaluation of physics engines and implementation of a physics module in a 3d-authoring tool. Master's Thesis in Computing Science, UmeA University, Suède, 2000.
- [140] K. Shimoga. Finger force and touch feedback issues in dextrous telemanipulation. *Proceedings of NASA-CIRSSE International Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration*, 1992.
- [141] M. Shimojo, M. Shinohara, and Y. Fukui. Human shape recognition performance for 3d tactile display. *IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation*, 1997.
- [142] A. Sledd and M. O Malley. Performance enhancement of a haptic arm exoskeleton. *Proceedings of the Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Virginia, USA, 2006.
- [143] M. Smyth. *Knowledge-Based Systems*. Elsevier, 2000.
- [144] K. M. Stanney. *Handbook of Virtual Environments : Design, Implementation, and Applications*. Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
- [145] P. Stergiopoulos. Conception et développement d'une interface à retour d'effort sur les doigts : Application à la simulation des interactions manuelles en réalité virtuelle. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2003.
- [146] D. Stewart. A platform with six degrees of freedom. In *Proceedings of UK Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180, N°15*, pages 941–947, 1965.
- [147] R.J. Stone. Virtual reality and telepresence. 1st Annual Conference on Virtual Reality, 1990.
- [148] Y.E. Sutherland. The ultimate display. *IFIPS Congress, Vol. 2*, pp. 506-508, 1965.

- [149] N. Tarrin, S. Coquillart, S. Hasegawa, L. Bouguila, and M. Sato. The stringed haptic workbench : a new haptic workbench solution. *Computer Graphics Forum*, volume 22, page 583, 2003.
- [150] P. Veron. Techniques de simplification de modèles polyédriques pour un environnement de conception mécanique. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 1997.
- [151] P. Veron and J.C. Leon. Static polyhedron simplification using error measurements. *Computer Aided Design*, Vol. 29, N° 4, pp. 287-298, 1997.
- [152] P. Veron and J.C. Leon. Shape preserving polyhedral simplification with bounded error. *Computer Graphics*, Vol. 22, N°5, pp. 565-585, 1998.
- [153] J. Vertut and P. Coiffet. *Teleoperations and robotics : evolution and development*. Prentice-Hall, 1986.
- [154] C. Ware, K. Arthur, and K.S. Booth. Fish tank virtual reality. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1993.
- [155] M. Wloka. Lag in multiprocessor virtual reality. *Presence Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 4, N°1, MIT, 1995.
- [156] P. Bach y Rita, J. G. Webster, W. J. Tompkins, and T. Crabb. Sensory substitution for space gloves and for space robots. In *Proceedings of Workshop on Space Telerobotics*, pages 51–57, 1987.
- [157] STT Ingenieria y Systemas. <http://www.stt.es/>.
- [158] K. Yamada, S. Walairacht, S. Hasegawa, M. Ishii, Y. Koike, and M. Sato. 4+4 fingers haptic display in the mixed reality environment. *Proceedings of the 10th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, Taiwan, 2000.
- [159] W. Yoon, T. Suehiro, Y. Tsumaki, and M. Uchiyama. A compact modified delta parallel mechanism design based on a stiffness analysis. *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2003.
- [160] C. B. Zilles and J. K. Salisbury. A constraint-based god-object method for haptic display. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1995.
- [161] T.G. Zimmerman, J. Lanier, C. Blanchard, S. Bryson, and Y. Harvil. A hand gesture interface design. *Proceeding CHI'87*, pp. 189-192, 1987.