

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

L'INTERACTIVITÉ TACTILE ET  
LA COMPRÉHENSION DE L'OBJET VIRTUEL :  
UTILISATION POTENTIELLE DE L'INTERFACE HAPTIQUE  
EN DESIGN INDUSTRIEL

par  
Anne Donaldson

Faculté d'aménagement

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de  
Maître ès science appliquées (M.Sc.A.)  
en aménagement  
option C.M.F.A.O.

26 août, 2003

©Anne Donaldson, 2003





**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

L'INTERACTIVITÉ TACTILE ET  
LA COMPRÉHENSION DE L'OBJET VIRTUEL :  
UTILISATION POTENTIELLE DE L'INTERFACE HAPTIQUE  
EN DESIGN INDUSTRIEL

présenté par

Anne Donaldson

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

M<sup>me</sup> Manon Guité  
président-rapporteur

M. Philippe La lande  
directeur de recherche

M. Temy Tidafi  
codirecteur

M. Tomas Dorta  
membre du jury

*Réaliser la représentation de l'irreprésentable,  
voir l'invisible, toucher et percevoir l'impalpable.*  
NOVALIS

## REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le produit d'un long processus de recherche auquel plusieurs personnes et organismes ont participé.

D'abord, l'Université de Montréal, qui m'a encouragée avec l'octroi d'une bourse au début de ces études.

Monsieur Philippe Lalande, mon directeur, qui m'a suivie dans cette recherche de l'utilisation de l'outil informatique dans le domaine du design industriel.

Monsieur Temy Tidafi, responsable du programme M.Sc.A. option CMFAO (conception modélisation fabrication assistée par ordinateur), directeur du GRCAO (groupe de recherche en conception assistée par ordinateur), professeur et codirecteur, qui a su m'enseigner et me guider tout au long de cette odyssee à travers le monde informatique.

Les différentes personnes que j'ai rencontrées et qui m'ont permis de mieux comprendre les interfaces haptiques. Monsieur Christophe Ramstein de Immersion Canada Inc. avec la souris Wingman, Monsieur Daniel Jonston et Monsieur Roberto Canas, du CNRS à London, qui m'ont permis de visiter le Centre de recherche en réalité virtuelle, et Monsieur Alexis Guigue avec la collaboration du département de génie mécanique de la Polytechnique de Montréal, en me donnant accès à une démonstration de l'interface haptique PHANToM.

Enfin, je veux remercier ceux et celles qui me côtoient et qui m'ont soutenue jour après jour; Guillaume, Carlos, Sihem, Sylvie, Jean-Pierre, Christianne, Lysandre... et tous les autres qui m'ont suivie tout au long de mon cheminement.

## SOMMAIRE

Notre recherche porte sur l'utilisation potentielle de l'interface haptique en design industriel et de son influence dans le processus de conception. L'hypothèse du mémoire se pose en ces termes : *L'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension de son modèle influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.* Pour étayer ce travail, la méta-analyse a été choisie afin de comprendre le fonctionnement de l'interface haptique PHANToM et de percevoir, à travers différentes études, la pertinence de son emploi en conception.

Ce mémoire est composé de six chapitres : le premier met en évidence le processus de conception en design industriel et l'utilisation de l'outil informatique. C'est à travers le processus de conception, la créativité et l'innovation, le modèle 3D et la CAO qu'est souligné l'apport de l'informatique dans le domaine du design. Le deuxième chapitre porte sur la perception tactile et le discernement de l'objet. Les caractéristiques physiologiques du système haptique humain sont étudiées pour mieux comprendre les attributs du toucher et de leur utilités. On s'intéresse aussi à l'interactivité qui permet l'échange d'information et facilite la compréhension des caractéristiques d'un objet. Le chapitre trois traite des interfaces haptiques, et du mode de fonctionnement de cette technologie à travers le rendu haptique, les applications et les recherches. Le chapitre suivant explique la méta-analyse, sa méthodologie et son processus d'analyse. Ce qui nous permet de soutenir notre étude qui porte sur les travaux effectués avec l'interface PHANToM, outil haptique de référence de cette analyse. Le chapitre cinq amène la discussion des résultats de cette méta-analyse afin de tirer les conclusions qui nous aideront à répondre à notre question de départ et à notre hypothèse. Enfin, le sixième chapitre constitue une conclusion générale de cette recherche qui permet de faire le point sur les différents sujets abordés et de répondre à nos interrogations.

Ce mémoire relève les possibilités d'une interface haptique dans divers domaines de recherche pour supporter l'utilité de la perception tactile dans la compréhension d'un modèle virtuel. Nous constatons que l'interactivité se retrouve dans la modalité haptique, que cette dernière est bidirectionnelle et qu'il y a échange sur le plan des sensations. L'accès aux caractéristiques physiques d'un objet amène une meilleure compréhension de celui-ci et l'utilisation de l'interface haptique est un atout appréciable en conception dans un environnement virtuel. Toutefois, au-delà du coût de l'équipement, le niveau actuel de développement de cette technologie et son manque de souplesse apportent un certain bémol à une utilisation plus généralisée dans le monde de la conception.

Mots clefs : Design industriel, Processus de conception, Modèle 3D, Perception tactile, Interface haptique, PHANToM, Méta-analyse.

## ABSTRACT

Our research deals with the potential use of haptic interface in industrial design and its influence on the process of conception. The main hypothesis of our work reads as follows: *Haptic interface leads to enhanced interactivity, which in turn, enables the designer to gain new information about his numerical model. Greater knowledge of the model ultimately influences the conception process in the field of industrial design.* As far as methodology is concerned, meta-analysis has been chosen in order to get a better understanding of the way the haptic interface PHANToM works, and to determine through various studies its value in conception.

This master's thesis is divided up into six parts: chapter one sheds light on the conception process in industrial design and the importance of computers as tools, in such areas as conception process, creativity, innovation, 3D models and CAD. Our second chapter covers tactile perception and discrimination of objects. Physiological characteristics of the haptic human system are examined in so far as they allow to gain additional insight into the sense of touch and its potential application. Interactivity contributes in this respect to accelerate the level of information exchanged and facilitates the comprehension of the various features of an object. Chapter three deals with haptic interface in terms of mode of operation, haptic rendering, application and research. In the following section, a study of meta-analysis is made, together with its methodology and analytical processing, with the goal of examining the interface PHANToM more thoroughly, the latter being the main haptic instrument of our study. Chapter five surveys the results of our meta-analysis and evaluates our initial hypothesis. Finally, the last chapter draws the general conclusion of our study, sums up the different topics dealt with and proposes answers to our main questioning.

This study gives an outline of the many possible applications of haptic interface in various fields of research and demonstrates how tactile perception enables any virtual models to be better apprehended.

Greater interactivity becomes bi-directional and enhanced sensation leads to a better understanding of the physical properties of an object shown in a virtual environment. On the other hand, high costs in terms of equipment and R&D, together with lack of flexibility, prevents haptic interface from being more broadly used in conception process.

Keywords: Industrial Design, Conception Process, 3D model, Tactile Perception, Haptic Interface, PHANToM, Meta-Analysis.

## TABLE DES MATIÈRES

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÉPIGRAPHE .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>REMERCIEMENTS .....</b>   | <b>IV</b>  |
| <b>SOMMAIRE.....</b>   | <b>V</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>VII</b> |
| <b>LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....</b>  | <b>XI</b>  |
| <b>INTRODUCTION.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>CHAPITRE I –LE PROCESSUS DE CONCEPTION EN<br/>DESIGN INDUSTRIEL ET L’OUTIL INFORMATIQUE .....</b> | <b>6</b>   |
| 1.1 Le processus de conception.....  | 6          |
| 1.1.1 La créativité et l’innovation .....  | 10         |
| 1.2 Le modèle 3D et la conception assistée par ordinateur.....                                       | 11         |
| 1.3 Conclusion .....   | 13         |
| <b>CHAPITRE II – LA PERCEPTION TACTILE ET LE<br/>DISCERNEMENT DE L’OBJET .....</b>                   | <b>14</b>  |
| 2.1 Les grands courants de pensées sur la perception .....   | 14         |
| 2.2 Caractéristiques physiologiques du système haptique humain .....                                 | 17         |
| 2.2.1 Le toucher.....  | 17         |
| 2.2.2 La main.....   | 18         |
| 2.2.3 Les caractéristiques de la vision et du toucher.....   | 19         |
| 2.3 L’interactivité et la perception haptique .....  | 20         |
| 2.4 Conclusion .....   | 22         |
| <b>CHAPITRE III – LES INTERFACES HAPTQUES .....</b>  | <b>24</b>  |
| 3.1 Les technologies haptiques .....   | 25         |
| 3.1.1 Le retour d’effort.....  | 25         |
| 3.1.2 Le retour tactile .....  | 35         |
| 3.1.3 Le retour thermique.....   | 38         |
| 3.2 Le rendu haptique.....   | 38         |
| 3.3 Les applications.....  | 40         |
| 3.4 Les recherches.....  | 41         |
| 3.5 Conclusion .....   | 44         |

|   |            |
|---|------------|
| <b>CHAPITRE IV – LA MÉTA-ANALYSE COMME SOUTIEN À<br/>NOTRE HYPOTHÈSE.....</b> | <b>46</b>  |
| 4.1 La méthodologie.....  | 46         |
| 4.1.1 La problématique.....   | 48         |
| 4.1.2 Les objectifs .....   | 48         |
| 4.1.3 L’hypothèse.....  | 48         |
| 4.1.4 L’explication des objectifs.....  | 48         |
| 4.1.5 Les sources .....   | 49         |
| 4.1.6 Les critères de sélection des textes .....                              | 49         |
| 4.1.7 Le processus d’analyse.....   | 52         |
| 4.1.8 Les conclusions .....   | 55         |
| 4.1.9 La bibliographie .....  | 55         |
| 4.1.10 Les données de références.....   | 55         |
| 4.2 Conclusion .....  | 55         |
| <b>CHAPITRE V – DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA MÉTA-<br/>ANALYSE.....</b>     | <b>56</b>  |
| 5.1 Le design industriel.....   | 56         |
| 5.1.1 Le modèle 3D.....   | 57         |
| 5.2 La perception.....  | 59         |
| 5.2.1 L’interaction haptique .....  | 60         |
| 5.2.2 La perception haptique et la perception visuelle.....                   | 61         |
| 5.2.3 La reconnaissance de l’objet.....                                       | 62         |
| 5.3 La technologie haptique .....   | 63         |
| 5.3.1 Les interfaces haptiques .....  | 64         |
| 5.3.2 Le rendu haptique.....  | 66         |
| 5.3.3 La texture .....  | 68         |
| 5.4 Conclusion .....  | 69         |
| <b>CHAPITRE VI – CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>                                 | <b>73</b>  |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>   | <b>78</b>  |
| <b>ANNEXE A - LE PHANTOM ET SES CARACTÉRISTIQUES<br/>TECHNIQUES.....</b>      | <b>90</b>  |
| <b>ANNEXE B – MÉTA-ANALYSE : TABLEAU DES RECHERCHES<br/>CONSULTÉES.....</b>   | <b>91</b>  |
| <b>ANNEXE C – MÉTA-ANALYSE : CITATIONS DES TEXTES<br/>CONSULTÉS .....</b>     | <b>100</b> |

## LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 : Le processus général de design.....   | 7  |
| Figure 2 : Le processus de conception .....  | 8  |
| Figure 3 : Le PHANToM .....  | 26 |
| Figure 4 : Le PHANToM Omni.....  | 27 |
| Figure 5 : Le Virtuose 3D.....   | 29 |
| Figure 6 : Le Virtuose 6D.....   | 30 |
| Figure 7 : Le Freedom.....   | 30 |
| Figure 8 : Le HapticMaster.....  | 31 |
| Figure 9 : Le Impulse Engine .....   | 31 |
| Figure 10 : Le Impulse Engine .....  | 32 |
| Figure 11 : Le Haptic Master.....  | 32 |
| Figure 12: L'exosquelette.....   | 33 |
| Figure 13 : Rutgers Master .....   | 34 |
| Figure 14 : Cybergrasp et Graspack.....  | 34 |
| Figure 15 : Le retour tactile pneumatique .....  | 36 |
| Figure 16 : Le retour tactile à matrice d'aiguilles.....                                       | 36 |
| Figure 17 : Le retour tactile par vibrations.....  | 37 |
| Figure 18 : Le retour tactile par manette.....   | 37 |
| Figure 19 : Le retour thermique.....   | 38 |
| Figure 20 : Le rendu haptique.....   | 39 |
|  |    |
| Tableau I Les applications et les besoins du retour haptique<br>dans le monde industriel ..... | 41 |
| Tableau II Le regroupement des codes en catégories .....                                       | 53 |
| Tableau III Le regroupement des catégories en thèmes.....                                      | 54 |

## INTRODUCTION

Dans le cadre de cette maîtrise en conception, modélisation et fabrication assistées par ordinateur (CMFAO), notre intérêt, en tant que designer industriel, se porte vers l'exploration d'une plus grande contribution de l'outil informatique à l'élaboration de nouvelles méthodes de travail.

Le but général de notre recherche est de saisir les caractéristiques et le potentiel d'une interface haptique<sup>1</sup>. Cette étude nous permettra de comprendre l'interactivité tactile dans l'accession de nouvelles informations relatives à un modèle numérique 3D et ainsi d'anticiper l'influence de cet outil sur la démarche de conception.

Selon Martegani (2000), la révolution informatique appliquée au design industriel a apporté des changements dans la fonction des objets, dans les matériaux ainsi que dans les processus par lesquels les objets sont fabriqués. Celle-ci entraîne un profond changement dans la façon dont nous concevons les fonctions ainsi que dans la méthodologie et la pratique du design. L'avènement de la technologie informatique modifie le design, mais aussi le processus complet de création et de production. Ces nouvelles techniques permettent de concevoir de nouveaux objets qui comportent des lignes fantaisistes, une grande variété de couleurs, des formes ergonomiques et des finis de surface agréables (matériaux synthétiques), ce qui fait apparaître une nouvelle esthétique. Ce sont les particularités visuelles d'un objet de design industriel, sa morphologie, son expression artistique ainsi que les sensations tactiles suscitées par son fini de surface, sa masse et ses avantages ergonomiques qui créent la convoitise et le plaisir (Lebahar, 1994). L'introduction progressive dans les bureaux de design des outils informatiques a fait passer le designer de la conception en atelier et sur la planche à dessin à une conception informatique 3D sur écran; cependant, cette technologie comporte une certaine complexité quant à son utilisation et aux connaissances permettant de la maîtriser.

---

<sup>1</sup> Le terme « haptique » vient du grec *hapesthai*, qui signifie « toucher » et « manipuler » (Sigraph, 1997).

La modélisation 3D<sup>2</sup> utilise différents types de surfaces et de méthodes de représentation des solides, que nous trouvons déclinés sous différentes formes, dans la plupart des logiciels de création 3D et de CAO (conception assistée par ordinateur) (Lebahar, 1994). La compréhension de la forme, nécessaire à la conception d'objets tridimensionnels, passe par la perception, laquelle joue un rôle de premier plan dans la quête de renseignements sur les variations géométriques de façon qualitative. Dans cette optique, il est aisé de croire que le toucher, associé au visuel, permet de mieux comprendre une forme de façon qualitative.

Dans un contexte informatisé, le toucher constitue une approche en plein développement. Reproduire la sensation du toucher par l'emploi de périphériques tactiles requiert une interaction électromécanique complexe avec le corps humain : c'est cette reproduction de la réalité qui permet de croire à ce que l'on ressent. Avec le recours aux logiciels informatiques comme outil d'aide à la conception, l'exploration de formes se fait directement à l'écran en 3D. Grâce au toucher, il est possible de collecter l'information localisée et détectée dans les propriétés physiques et spatiales de l'objet par le biais du système haptique. L'interface haptique permet à l'individu d'avoir accès, à travers des sensations tactiles, à des objets virtuels et de les manipuler dans un monde irréel (Pimentel, Ken et Teixeira, 1994).

La question de recherche est formulée ainsi :

*Comment l'interactivité provoquée par l'utilisation d'une interface haptique, lors de la création d'un modèle informatique, peut-elle avoir une incidence sur la démarche de conception?*

Nous supposons que c'est cette interactivité qui permet l'échange d'informations amené par le sens du toucher. Ces informations, qui sont disponibles en cours de conception, peuvent modifier le processus de création en permettant de valider de façon tactile différentes possibilités.

---

<sup>2</sup> Représentation du réel par un schéma modèle en trois dimension (dictionnaire de l'informatique et d'internet).

L'interactivité implique l'idée de transformation, de développement et d'évolution, qui sont des composantes d'un phénomène plus large de création.

Les objectifs de cette recherche sont au nombre de deux:

1– *Comprendre quelles informations sont apportées par la technologie haptique et comment celles-ci peuvent influencer un processus de design industriel.*

L'influence du toucher sur la compréhension du modèle informatique 3D est au cœur de ce travail, et l'utilité de ces informations pourra orienter la pertinence de l'utilisation de l'interface haptique dans le processus de création. Ces informations permettront de mieux comprendre cette technologie et son application dans la profession. Elles seront étudiées à travers le design industriel et le modèle 3D<sup>3</sup>, ses applications et la recherche dans le domaine, la perception c'est-à-dire l'interaction haptique<sup>4</sup>, la perception haptique et visuelle et la reconnaissance de l'objet, la technologie haptique<sup>5</sup> avec les interfaces haptiques<sup>6</sup>, le rendu haptique<sup>7</sup> et la texture.

2– *Comprendre la différence entre le toucher physique et celui que procure une interface haptique.*

Il s'agit de saisir la différence de lecture (qualité de l'information) entre la perception physique et la perception virtuelle pour une utilisation plus judicieuse dans le processus de design.

De cette connaissance, nous tenterons de répondre à certaines questions plus générales afin d'apprécier l'utilité de la technologie haptique dans le domaine du design industriel.

---

<sup>3</sup> Objet en trois dimensions imitant un autre objet, peut-être d'une taille très différente (Antidote 2000).

<sup>4</sup> L'interaction haptique doit spécifier, d'une part, la détection de collisions entre le bout du détecteur générique et les objets dans la scène et, d'autre part, la réponse de la collision, comme les forces reflétées à l'utilisateur (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002).

<sup>5</sup> Théorie générale et études spécifiques (outils, machines, procédés...) des techniques haptiques (Le Petit Robert, 1999).

<sup>6</sup> Ces interfaces permettent d'avoir accès par le toucher à la forme, au poids, aux textures superficielles et à la température (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999).

<sup>7</sup> Les forces transmises par une interface haptique. (Horizons, 2003).

Ces questions sont :

- *Cet outil informatique permet-il une augmentation de l'efficacité sur le plan de la conception?*
- *Peut-on considérer que ce changement dans la conception sera un vecteur d'évolution de la discipline (qualité de la démarche)?*
- *Comment les interfaces haptiques actuelles devraient-elles évoluer idéalement?*

Notre hypothèse, s'exprime ainsi :

*L'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension de son modèle influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.*

Autrement dit, l'information qui est livrée par l'interface haptique contribue à la compréhension de l'objet que le concepteur modélise, en lui apportant d'autres renseignements par la voie des sensations tactiles. Ces informations lui permettent de gérer les différentes caractéristiques du produit au début et pendant tout le processus de conception. La compréhension de ces formes numériques permettra au designer industriel d'avoir un meilleur contrôle, sur le plan esthétique, fonctionnel et émotionnel durant tout le processus créatif.

Ainsi, nous verrons, dans un premier temps, le processus de conception en design industriel et l'impact de l'utilisation de l'outil informatique avec le modèle 3D et la CAO. Ensuite, nous aborderons le rôle de la perception tactile dans la compréhension de l'objet à travers les grands courants de pensée sur la perception et les caractéristiques physiologiques du système haptique humain. Ce qui nous amènera à comprendre l'interactivité dans la perception haptique.

Puis nous traiterons des interfaces haptiques, du rendu haptique, et des différentes applications et recherches dans le domaine, afin de mieux comprendre le fonctionnement de cette technologie.

Suivra l'explication de la méthodologie utilisée pour notre recherche, la méta-analyse et la discussion des résultats obtenus. Pour conclure, nous ferons le point sur nos objectifs et notre hypothèse relativement à notre méta-analyse.

# CHAPITRE I

## Le processus de conception en design industriel et l'outil informatique

La CAO agit sur le processus de création et de production en mettant entre les mains du designer un outil qui lui permet de gérer une grande quantité de données très rapidement et de concevoir des formes directement en trois dimensions. Il peut intégrer, dans ce modèle virtuel, des données techniques venant de la définition physique de l'objet (matériaux, structures, texture, poids, fonctions de tolérance, etc.) et cette traduction numérique lui permet de transmettre l'information exploitable dans d'autres applications comme la simulation, l'optimisation, les programmes d'usinage et le prototypage rapide. Par conséquent, le développement des systèmes informatiques amène le designer vers un environnement d'aide à la conception qui réactualise le processus. Nous examinerons dans ce chapitre la démarche du designer industriel pour concevoir un produit afin de mieux comprendre comment l'interface haptique peut jouer un rôle dans le processus de design.

### 1.1 Le processus de conception

Actuellement, le designer est confronté à de nouveaux enjeux industriels qui entraînent une réduction des délais de conception et de réalisation d'un produit. L'informatique a permis d'accélérer le processus de conception, une évolution majeure dans le design industriel qui donne au concepteur la possibilité d'utiliser des données numériques et d'intervenir à n'importe quelle étape du processus pour modifier l'idée initiale. Elle a réduit le temps d'exécution et de manipulation dans la façon de concrétiser l'idée par rapport à l'utilisation des procédés traditionnels comme le papier, le crayon, la maquette ou le prototype.

Cette dématérialisation de la production (données numériques) a aussi rendu possible la conception collaborative qui permet à différentes équipes de travailler en ingénierie simultanée, en conservant une cohérence (Lécuyer, 2001).

Il existe différentes méthodes pour concevoir un produit, le processus de design est une procédure qui évolue avec la pratique, elle prend des formes et des terminologies diverses en fonction de l'ampleur du problème, du domaine concerné, de la nature de l'industrie et de nombreux autres facteurs.

Le processus décrit à la figure 1 est une méthode en huit étapes. C'est une base pour l'élaboration d'une méthode plus détaillée et mieux adaptée aux besoins du concepteur et du produit qu'il doit réaliser (Gauvin).

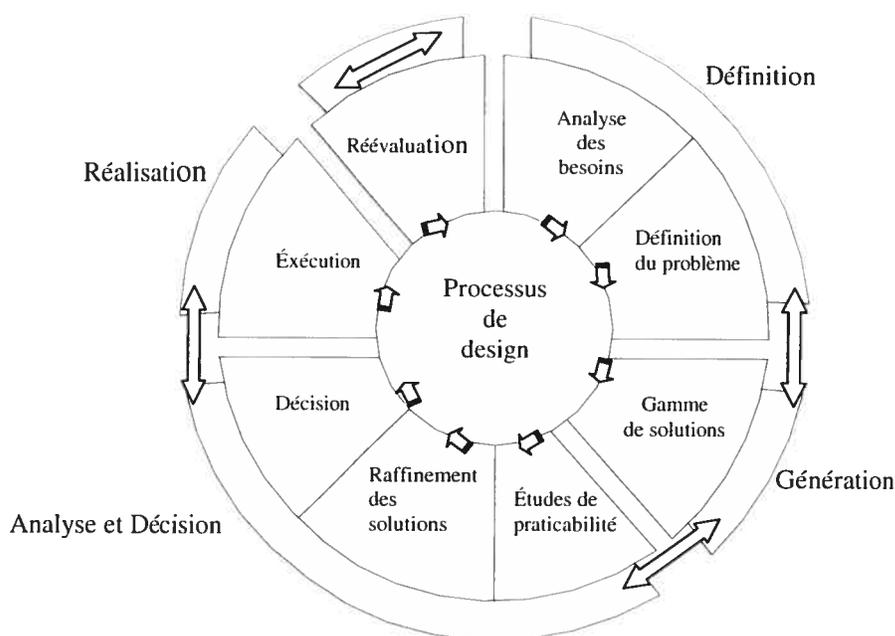


Figure 1 : Le processus général de design<sup>8</sup>

### Définition

#### *Analyse des besoins :*

Cueillir suffisamment d'informations pour définir l'envergure, le but et les antécédents d'un problème

#### *Définition du problème :*

Définir le but, les objectifs et les restrictions en relation avec les besoins.

Établir les difficultés particulières qui doivent être surmontées.

<sup>8</sup> Source : Gauvin, 1979, p. 13.

Établir les critères d'évaluation qui permettront de juger les solutions proposées.

### **Génération**

*Gamme de solutions :*

Établir une gamme de solutions incluant celles connues et d'autres nouvellement créés.

### **Analyse et décision**

*Étude de praticabilité :*

Étude de praticabilité physique et économique de diverses solutions.

*Raffinement des solutions :*

Raffiner et développer davantage les quelques solutions retenues pour mieux guider la décision.

*Décision :*

Examiner les aspects positifs et négatifs de chacune des solutions optimisées et choisir une solution en respectant les critères établis précédemment.

### **Réalisation**

*Exécution :*

Produire les résultats sous une forme compréhensible pour ceux à qui s'adresse ce produit (ex: plans et devis, prototype, maquette, etc.)

*Réévaluation*

Si le résultat obtenu n'est pas satisfaisant, on peut reprendre en se servant des renseignements déjà obtenus. (Gauvin, 1979, p.13)

Le processus de conception lié à chaque étape (figure 2) est une démarche itérative.

Chacune des étapes se définit par quatre phases

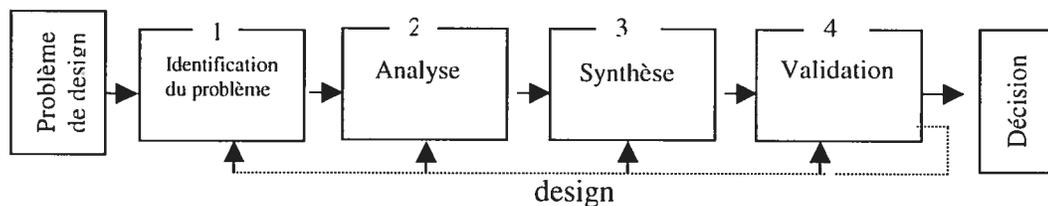


Figure 2 : Le processus de conception<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Source : Quarante, 1984, p. 290.

Ainsi, le processus de conception est le cadre dans lequel le designer utilise différentes techniques de recherche d'idées comme :

- le *remue-méninges*, qui est une façon de générer le plus d'idées possible sans critique ou évaluation de celles-ci;
- la *charte morphologique*, qui permet de rechercher des idées de façon méthodique en disséquant le problème par unité, sans s'occuper de l'influence de chaque unité l'une sur l'autre. Ensuite, on doit combiner les moyens suggérés entre eux;
- la *méthode d'adaptation*, qui cherche à résoudre le problème, en adoptant une solution qui existe déjà dans une autre sphère d'activités;
- la *méthode de personnalisation*, qui est efficace sur le plan des mécanismes, consiste à visualiser des approches de solution en s'incorporant soi-même au problème à solutionner. (Gauvin, 1979)

Pour communiquer ses idées, le concepteur a recours à divers médium, média et instrumentations comme :

- le *dessin de proposition* (présentation de concept préliminaire), qui comprend l'esquisse, le schéma, l'illustration ou la perspective;
- le *dessin de concept*, qui représente le tracé d'ensemble à l'échelle, soit le concept avancé;
- le *maquette ou modèle 3D*, qui est la représentation tridimensionnelle à l'échelle afin d'aider l'interprétation du visuel;
- le *dessin d'exécution et de fabrication*, c'est le dessin d'ensembles et de sous-ensembles respectant les normes de dessin technique. Il suggère les séquences de montage ou d'assemblage;
- le *prototype expérimental ou de laboratoire*, c'est le prototype pour évaluer partiellement les performances fonctionnelles ou ergonomiques du produit;
- le *prototype présérie* (préproduction), c'est le prototype servant à faire l'évaluation complète et finale des caractéristiques fonctionnelles, formelles et esthétiques du produit. Il sert de modèle et de référence pour la fabrication. (Gauvin, 1979)

C'est à travers le processus de conception que le designer exprime sa créativité afin d'innover dans le monde de l'industrie.

### 1.1.1 La créativité et l'innovation

La créativité est un élément essentiel dans la démarche de conception, il convient donc de l'examiner car :

[...] toute action de conception est, quelque part, créative et pourrait être comparée au langage, à la composition musicale et à l'art. Cependant, la compréhension de cette activité complexe est loin d'être maîtrisée. (Barhin, 79; Lawson, 80; Gero, 89; cité dans Zreik, 1991, p.18)

La création est la capacité de trouver une solution originale et efficace à un problème (Gergory 1966; cité dans Zreik, 1991). Elle est une marque de changement qui s'opère à tous les niveaux du processus de design, autant dans la production que dans la définition des objets.

*If you can determine exactly how much it will cost, exactly how long it will take, and exactly what the result will be, you are doing the same old thing<sup>10</sup>.* (Mullin, 1990; cité dans Insensee et Rudd, 1996, p. 15)

On retrouve différents avis sur la représentation et la définition de l'acte de conception créative. Selon Swinson (1982), il existe deux types d'approche dans le processus de conception. L'approche imaginative, qui sert à prendre des décisions créatives, utilise des connaissances intuitives dans un champ d'action assez large. L'approche rationnelle concerne des tâches de production de tests de routine soumis à nombre de contraintes limitant le champ d'action (Swinson, 1982; cité dans Zreik, 1991).

Brown et Chandrasekaran (1988) répertorient les activités de conception en trois classes. La première est la conception innovante. Dans cette classe, ni les stratégies de résolution de problèmes ni les sources de connaissances ne peuvent être connues à l'avance. La deuxième classe est apparentée à la conception routinière avec une mince possibilité d'innovation. Seules les sources de connaissances utilisées peuvent être connues à l'avance.

---

<sup>10</sup> Notre traduction : « Si vous pouvez déterminer exactement combien cela vous coûtera, combien de temps cela vous prendra et le résultat exact de ce que cela sera, vous avez fait la même vieille chose. »

Et la troisième classe est la conception routinière qui utilise des sources de connaissances et des stratégies de résolution connues à l'avance (Brown et Chandrasekaran, 1988; cité dans Zreik, 1991).

Pour Gero (1989), le but de l'action de conception est de fournir une description d'un artefact correspondant à une fonction donnée. Ainsi, le processus de conception consiste à produire une forme qui peut être constituée d'un ensemble d'éléments ou de mots à partir d'une description informelle pouvant être traduite par un ensemble de fonctions (Gero, 1989; cité dans Zreik, 1991).

Enfin, Lebahar (1994) distingue deux types de créativité : la créativité abstraite, qui est la capacité à trouver une nouvelle solution originale et efficace à un problème, et la créativité subjective, qui est fortement liée à un individu ou à un groupe composé d'éléments de base concrets.

L'expérience prouve que les solutions en design restent souvent des compromis entre des considérations techniques et économiques, entre un démarquage de la concurrence ou une demande de l'utilisateur et que l'invention de nouveaux objets peut être la conséquence d'une association soit de fonctions, soit de technologies (Zreik, 1991). La nécessité d'innover en design industriel dans la création de produits se traduit dans la demande des consommateurs avides de nouveautés. Cette création rapide d'objet peut être améliorée avec la contribution de l'outil informatique.

## **1.2 Le modèle 3D et la conception assistée par ordinateur**

Dans la conception d'objet, la validation d'une idée passe par sa concrétisation, c'est-à-dire par sa mise en forme de façon physique ou virtuelle. De nombreuses raisons justifient l'utilisation d'un modèle 3D afin d'évaluer un produit. Son emploi amène une compréhension des spécifications du produit à réaliser. Il sert à la compréhension de l'objet durant sa conception en établissant le lien entre la théorie et la pratique par l'analyse des fonctions afin d'observer si elles correspondent aux services attendus.

Du côté formel, le modèle 3D permet d'analyser l'aspect physique en relation avec les sens, la résistance à la gravité et de la stabilité, la perception, la manipulation et la sécurité. Il permet la représentation des caractéristiques précises du produit ainsi que l'analyse d'innovations qui font appel à de nouveaux concepts. Pour ce qui est du fonctionnement, le modèle 3D améliore la communication avec l'utilisateur, la simulation des fonctions, l'analyse du rapport fonction-usager (estime), l'analyse de la fonction première du produit (utilité), et l'analyse fonctionnelle (fonctionnalité). En ce qui a trait à la production, il permet de vérifier si le produit est manufacturable, il analyse les fonctions dans des conditions d'utilisation prévues et pour un temps déterminé (fiabilité) et facilite l'analyse de l'aptitude du produit à être maintenu en bonne condition de fonctionnement. Pour ce qui est de la mise en marché, le modèle 3D met le produit en contexte afin de vérifier la satisfaction du consommateur. Le modèle 3D peut être réalisé de manière physique ou numérique, ce ne sont toutefois pas les mêmes caractéristiques qui sont disponibles.

Le modèle numérique est un ensemble organisé de données qui constituent les caractéristiques de la structure de l'objet. C'est une représentation 3D de l'objet considéré comme une maquette virtuelle que le concepteur peut transformer et modifier. Ce modèle simule l'objet par sa représentation visuelle. Mais, au-delà de la visualisation formelle à l'écran, la modélisation 3D contient des informations qui permettent de le définir physiquement et, ainsi, d'avoir les données pour sa fabrication et des analyses. La CAO, dans le cadre du processus de design, permet de créer les données de l'objet à concevoir, de manipuler celles-ci afin d'aboutir à une forme achevée de conception et de cette modélisation générer les informations nécessaires à sa fabrication. La maquette numérique est perçue comme un outil d'amélioration du temps de réaction par rapport aux variations des marchés, d'aide à la conception et au développement de nouveau concept, d'optimisation du produit, d'anticipation des problèmes de fabrication, de maintenance, de contrôle et de conditionnement et aussi de réalisation de test sur le produit pour vérifier ses caractéristiques (art of design.com, 2000).

Cette modélisation informatique oblige le concepteur à imaginer son modèle globalement, ce qui amène une cohérence car il peut mieux définir les pièces complexes et les visualiser sous tous ses angles. L'utilisation croissante de la technologie numérique 3D (simulations, analyses des contraintes, optimisations, programmes d'usinage, prototypage rapide) utilisable seulement à partir de modèle numérique 3D astreint de plus en plus le designer à concevoir en 3D plutôt qu'en 2D (Wafflard, 1998).

### **1.3 Conclusion**

L'avènement de l'informatique en design industriel a bouleversé le processus par lequel le créateur développe un produit. La CAO a accéléré le processus de conception en permettant au designer d'utiliser des données numériques pour élaborer et modifier son concept. L'innovation étant partie intégrante du développement de nouveaux produits, l'industrie demande au concepteur de proposer des solutions pertinentes et inventives; il doit composer avec sa créativité afin d'évoluer dans un monde de plus en plus compétitif.

C'est le modèle qui est au centre de la conception d'un objet. Il sert à la compréhension de l'objet pendant sa conception, en donnant la possibilité au créateur de tester son idée. Cette traduction virtuelle ou réelle de l'objet lui permet d'émettre différentes solutions géométriques, qui peuvent être visualisées, simulées ou optimisées. Le modèle numérique est un outil d'aide à la conception qui sert à représenter des objets virtuels et peut offrir, par le biais d'équipement sophistiqué, une simulation de la réalité.

Le grand défi du modèle virtuel en conception industrielle demeure la validation des caractéristiques physiques et des fonctions du produit, ce sur quoi se concentrera la suite de notre propos.

## CHAPITRE II

### La perception tactile et le discernement de l'objet

Après avoir fait le point sur l'utilisation de l'outil informatique en design industriel et de son impact dans le processus de conception, notre démarche nous amène à nous interroger sur l'importance du toucher dans la compréhension d'un objet lors de la conception.

C'est par la perception tactile que se fait le contact avec le monde des objets et cette possibilité de toucher les surfaces renseigne simultanément sur la texture, la forme et les qualités conductrices (température) de ceux-ci. Le toucher peut aussi être supporté par d'autres stimulus (visuels ou sonores) afin de comprendre la structure globale de l'objet et les propriétés de la surface. En effet, ces renseignements corrélatifs ont mené des chercheurs à supposer que le toucher soit le sens de la réalité plus que les quatre autres sens humains (Wall et Harwin, 2000).

Robert Marty écrit :

Notre postulat fondamental sera que toutes formes, quelles qu'elles soient, sont nécessairement déjà présentes dans les actes de perception qui met en jeu, de façon indissociable, sujets percevant et objets perçus. C'est une façon de dire sans aucune autre originalité que de l'exprimer à travers une conception formalisée de la forme, que toute connaissance vient de l'expérience sensorielle. (Marty, 1994, p. 2-3)

La perception est la porte d'entrée des sensations et c'est par elle que nous comprenons le monde qui nous entoure.

#### 2.1 Les grands courants de pensées sur la perception

Pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le phénomène de la perception haptique, il convient d'examiner différentes théories sur la perception.

Les philosophes furent intrigués par la perception des objets et les différentes modalités de prise d'information. Comme le rapporte Morgan (1977), Aristote avance que seulement certains paramètres particuliers des objets tels le nombre, le

mouvement, le repos, la forme, l'unité et la grandeur ont un *commun sensible* aux différents sens. À la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, Locke distingue les qualités primaires comme les caractéristiques ou propriétés indissociables des objets perçues dans différentes modalités (forme, grandeur, etc.) et les qualités secondaires limitées à une seule modalité. En opposition, Kant (1781) considère que les formes de la perception seraient « supramodales », émergeant des propriétés de l'esprit humain et non de celles des objets. Tant qu'à Berkeley (1709), il propose l'expérience tactile comme précédente à l'expérience visuelle avec sa doctrine *Touch Teaches Vision*, ce qui inspire encore des études expérimentales actuelles (Morgan, 1977; cité dans Rochat, 1984, p. 8).

Chez nos contemporains, différents psychologues se sont penchés sur la perception. Le mouvement de la Gestalt, élaboré par Kohler (1929) et Koffka (1935), traite de la perception tactile et visuelle de l'objet à travers les structures physique et mentale, ce qui unifie les modalités sur les plans phénoménal et fonctionnel. Les attributs organisés de l'objet sont indépendants des modalités perceptives. Leurs travaux expérimentaux sont basés sur les configurations bidimensionnelles (Kohler, 1929 et Koffka, 1935; cité dans Rochat, 1984).

Pour Revesz (1950), le tactile et le visuel sont complètement indépendants. Sa position est originale et isolée dans la différence des modalités (Revesz, 1950; cité dans Rochat, 1984). Les impressions spécifiques à ces modalités ne sont pas préexistantes dans les sens. L'auteur tente de démontrer l'hétérogénéité phénoménale des qualités sensorielles de l'œil et de la main. Il considère la perception tactile indépendante de la vision, celle-ci ayant ses propres fonctions, ses activités et ses lois tout en faisant usage de l'aide de la vision (Hatwell, 1986).

Des psychologues soviétiques (Ananiev, Wekker, Lumov et Yarmolenko, 1959) ont travaillé dans le domaine de la perception, en traitant des relations entre le codage visuel et tactile de l'objet. Leur point de vue constructiviste propose que les activités perceptives visuelles et tactiles dépendent de la structure physique de l'objet et du traitement des modalités de perceptions superposables.

C'est donc l'objet qui détermine l'activité d'exploration et rend le traitement intermodal superposable. Ceux-ci établissent que l'image formée à partir de l'objet a les mêmes caractéristiques sur les plans visuel et tactile. Ces observations sont basées sur une « équivalence » des performances intermodales et une comparaison dans la prise d'informations (Ananiev, Wekker, Lumov et Yarmolenko, 1959; cité dans Rochat, 1984).

La position de Gibson (1966) est qualifiée de réaliste, associant les informations perçues aux qualités de l'objet plutôt qu'à des qualités sensorielles. Dans ce sens, les traitements visuel et tactile passent par les mêmes dimensions invariantes comme la texture, la grandeur, la forme, la consistance qui « sont des qualités des objets et non pas des qualités des sens » (Gibson, 1966; cité dans Rochat, 1984, p. 13). L'information est contenue dans l'environnement et ne serait pas reliée à la spécificité fonctionnelle et phénoménale correspondant aux différentes modalités de prise d'information. Ainsi, la forme est étudiée dans une perception tridimensionnelle, elle se rapporte aux objets solides (Rochat, 1984).

Tant qu'à Wekker (1966), il met en évidence que certains invariants de l'objet sont transformés en signal-code et transforment ce codage en image (Wekker, 1966, cité dans Rochat, 1984). Vurpillot (1972), lui, considère l'image comme une interface entre la stimulation et le sujet (Vurpillot, 1972; cité dans Rochat, 1984)

Pour ce qui est de l'approche cognitiviste, la structure générale de l'action dépend du sujet. Les perceptions visuelles et tactiles assurent la fonction de connecteurs (Piaget, 1961; cité dans Rochat, 1984). « Dans la perspective de Piaget, le sujet ne traite que les paramètres de l'objet physique qu'il peut reconstruire sur la base de ses actions et de ses opérations. » (Rochat, 1984, p. 38)

Enfin, Hatwell considère que l'activité d'exploration fait par l'œil ou la main serait analogue : elle dépendrait du processus de la structure générale des actions (Hatwell, 1986). Toutes ces théories tentent de démontrer l'importance du processus de perception dans la compréhension de ce qui nous entoure.

## 2.2 Caractéristiques physiologiques du système haptique humain

C'est par le corps que sont perçues les sensations haptiques et la main est l'instrument principal qui amène les données perceptives tactiles. Ainsi, le toucher permet une exploration et une localisation des objets en rapport au corps, il joue un rôle important dès qu'un contact est réalisé et tant que dure ce contact. Les perceptions sont des sources d'information correspondant à la nature des récepteurs, ce ne sont pas des copies réelles. L'image est donc la représentation d'une excitation. La main et l'œil agissent en étroite collaboration, certaines propriétés des objets relèvent de l'une ou l'autre modalité. Cependant, plusieurs aspects spatiaux sont perçus à la fois par la main et par l'œil (localisation, orientation, distance, forme, grandeur) (Hatwell, 1986).

### 2.2.1 Le toucher

C'est le toucher qui nous permet d'être en contact avec les sensations physiques. La stimulation du toucher actif est localisée dans les corpuscules de Meissner, ces récepteurs sont maximaux sur les lèvres, la langue et la face interne des doigts, et minimaux sur l'abdomen et les jambes (Hatwell, 1986).

Le système que notre corps utilise pour recevoir et élaborer un jugement quant aux rétroactions est nommé *système haptique*. Il est divisé en deux catégories, qui utilisent deux types de récepteurs pour collecter les informations. Ces récepteurs sont appelés *mécanorécepteurs* et *propriocepteurs*.

Le système haptique se sert des mécanorécepteurs pour détecter des pressions, ce qui nous permet de distinguer des textures [...] Les propriocepteurs alimentent le cerveau en rétroactions basées sur les forces qui proviennent de l'intérieur du corps, alors que les mécanorécepteurs nous fournissent des informations quant aux forces issues de l'extérieur. (Gradecki, 1994, p.117-118)

C'est grâce à ces données physiques que l'on peut reconnaître certains aspects d'un objet.

### 2.2.2 La main

La main est le meilleur organe perceptif tactile, car il est le plus mobile et sa structure musculaire et articulaire possède un équipement sensoriel très perfectionné. La main a une excellente discrimination sensorielle grâce à la forte concentration de récepteurs sur la face interne des doigts; elle possède une fonction métrique qui est un mesurant naturel (Hatwell, 1986).

La main est une structure complexe dont la fonction perceptive est imbriquée à une fonction motrice qui connaît, chez l'homme, un développement considérable : celle d'instrument de travail grâce auquel sont réalisés la saisie, le transport et la transformation des objets à des fins utilitaires. (Revesz, 1950, Gibson, 1966; cité dans Hatwell, 1986, p. 34)

Elle peut exécuter deux types de mouvements : le mouvement non préhensible en utilisant la main comme un tout pour pousser, taper, et le mouvement préhensible qui est employé pour saisir un objet et le maintenir (Hatwell, 1986). En fait, il existe deux modes d'agrippement des objets : la prise puissance où les doigts sont comme des crampons, partiellement fléchis et serrent l'objet entre eux et la paume. Ce sont les pouces qui sont maintenus dans le plan de la paume et qui exercent une pression dans le sens opposé à celle des autres doigts. Et la prise précision où la main sert de pince. Dans ce cas, les doigts sont fléchis et le pouce opposé prend l'objet sans participation de la paume. Selon Napier, ce n'est pas la forme de l'objet qui détermine le type de prise mais la finalité de la tâche (Napier, 1956; cité dans Connolly et Elliott, 1972; cité dans Hatwell).

Pour ce qui est de la perception cutanée, c'est la déformation de la couche superficielle de la peau (sans participation des jointures et des muscles); ce toucher passif permet de connaître les propriétés spatiales (forme, position, etc.) et le mouvement de la source de stimulation. La perception proprioceptive permet de percevoir la position des différentes parties de son corps par rapport à l'espace extérieur, ce qui joue un rôle dans la localisation spatiale de la perception tactile.

Quant à la perception tactilokinesthésique, elle résulte du contact d'un mouvement actif du sujet avec une surface; c'est ce toucher actif qui permet la perception des propriétés spatiales et physiques de l'environnement. Dans l'activité d'exploration, la zone de contact du champ perceptif tactile est beaucoup plus réduite que le champ visuel qui lui correspond. Les objets matériels étant généralement inertes, c'est le sujet qui doit déployer un mouvement afin d'explorer ceux-ci. La perception est encore plus accentuée quand les deux mains explorent en même temps un objet. Cette perception bimanuelle peut-être identique, symétrique ou différente, synchrone ou alternée. Nos mains sont des outils indispensables lors de manipulation d'objets, elles nous permettent d'accomplir des actions et sont le véhicule de sensations.

### **2.2.3 Les caractéristiques de la vision et du toucher**

La perception passe par les sens; c'est la vision et le toucher qui, en conception d'objets, sont les plus sollicités. L'œil et la main sont des capteurs dont l'humain dispose pour résoudre le codage des caractéristiques d'un objet; ils sont des instruments utilisés activement dans l'élaboration des propriétés spatiales (Rochat, 1984). « Le monde perçu est un monde polysensoriel : il est vu, entendu, touché, senti ou goûté selon les cinq sens traditionnels de la réceptivité sensorielle. » (Rochat, 1984, p. 1)

La vision et le toucher sont les sens les plus comparables; ces deux différents instruments permettent de résoudre des tâches identiques. Le système visuel et tactile a comme caractéristique générale la localisation sur le corps de récepteurs sensoriels.

En ce qui a trait à la perception visuelle, les récepteurs sont localisés au niveau de la tête. Les récepteurs tactiles sont dispersés inégalement sur toute la surface du corps avec une grande concentration à l'intérieur et autour de la bouche, sur la face interne des dernières phalanges des doigts. L'œil est l'organe exclusif de la vision tandis que la main est l'organe privilégié de la perception tactile. Les modalités visuelle et tactile demandent, dans leur fonctionnalité, un contact spécifique avec l'objet.

La vision est une perception indirecte par la distance avec l'objet perçu, tandis que le toucher est direct, car la stimulation demande un contact cutané.

Cette différence limite la perception tactile à l'accessibilité de préhension du sujet, alors que la perception visuelle reçoit les informations bien au-delà des limites du tactile (Hatwell, 1976).

Ainsi, Hatwell (1976) distingue une fonction effectrice ou instrumentale de la main et une fonction réceptrice dépendante lors de manipulations actives à l'opposé de l'œil qui, avec sa perception à distance, a une activité essentiellement de réception. Du côté de la capture des informations au niveau temporel, l'exploration active du contact cutané avec l'objet est marquée par son caractère successif. L'œil, avec sa grande mobilité et son champ distal, a une nature successive mais plus efficace au point de vue temporel.

Pour Wing, Haggard et Flanagan (1996), la prédominance de la vision sur le plan cognitif relègue le toucher à une participation mineure et souvent restreinte à certains domaines. Mais, par ailleurs, comme le toucher est une modalité qui participe pleinement aux processus d'intégration multisensorielle, il est en grande partie redondant avec la vision pour l'accès à la connaissance spatiale de l'environnement. C'est grâce à sa grande flexibilité et à son haut potentiel de substitution que le toucher apparaît comme un système perceptif puissant et efficace (Hatwell, Streri et Gentaz, 1997).

Le toucher amène une compréhension différente d'un objet par le contact qui doit se produire pour être en fonction. Ce canal d'information transmet des sensations qui peuvent être utiles durant la conception.

### **2.3 L'interactivité et la perception haptique**

L'information qui passe par le toucher amène la notion d'interactivité, donc d'échange.

Le terme « interactivité » est employé dans le cadre des nouvelles technologies. De cette expression s'est développé le concept que tout ce qui est touché se réclame de l'interactivité (Giardina, 1999).

Ce qui constitue l'interactivité : simplement, la reconnaissance; la perception ne constitue-t-elle pas le premier degré d'interactivité? (Antoine Schmitt cité par Cordiez, 2001, p. 1)

La perception haptique est donc une source d'information qui permet le dialogue entre l'homme et l'objet. L'interactivité décloisonne la communication traditionnelle, qui se caractérise par une transmission et une réception dirigée et contraignante. Elle ouvre un champ d'action où le sujet doit interagir avec le contenu afin d'arriver à une interprétation (Mongeau, 1994).

L'interactivité devient donc une relation bidirectionnelle où la machine est consciente de ce qu'on fait. En poussant davantage cette façon de percevoir l'interactivité, on devrait pouvoir réellement transformer et agir sur les informations mises à notre disposition. De plus, l'interactivité est fortement connotée par la dimension d'immédiateté, de court délai entre une réponse et la réaction du système. (Giardina, 1999, p. 34)

Nous pouvons percevoir deux catégories distinctes d'interactivité : l'interactivité statique, qui oblige le sujet à faire des choix et qui reçoit une information relative à ceux-ci, et l'interactivité dynamique, qui permet des transactions d'informations plus complexes. Dans ce contexte, l'environnement pose une question, l'utilisateur répond et, par la suite, le système traite la réponse pour poser une autre question (Giardina, 1999).

Nous retrouvons aussi deux types d'application de l'interactivité dans le domaine informatique. La première est celle qui découle des dimensions d'échange et d'interaction propres à l'interactivité. Cette communication entre l'univers humain et celui de la machine se fait par le truchement d'interfaces; l'interface étant le dispositif qui permet l'entrée et la sortie de données dans le monde informatique.

Le second type découle du processus interactif par rapport aux transformations du champ social et implique la notion d'échange et de changement rattachée à toute une série de connotations positives comme celle d'évolution, de croissance, de nouveautés (Mongeau, 1994).

L'interactivité demande en fait à ce qu'un espace perceptif soit mobilisé, espace qui est garant de la latitude d'action souhaitée. Cet espace peut-être visuel, ce qui est le plus courant, mais il peut aussi être de nature sonore, ce qui est plus difficile à concevoir, ou même plus physique, les modalités d'interaction étant alors explicitement transposées dans un espace concret ou simulé comme c'est le cas dans la réalité virtuelle. (Mongeau, 1994, p. 127)

Cette notion d'interactivité nous permet un échange d'information qui est à la base de la compréhension d'un objet. C'est par le biais de l'interface haptique que le dialogue s'établit entre l'utilisateur et le modèle. Cette technologie nous amène vers de plus grandes possibilités d'analyse de l'environnement virtuel.

## **2.4 Conclusion**

La perception tactile permet d'avoir de l'information sur l'objet que l'on touche et d'avoir une compréhension de ses caractéristiques physiques et spatiales. Il existe différentes théories sur la perception qui cherchent à comprendre le système perceptif humain. Les grands courants de pensées amènent en avant plan l'importance de la perception dans la compréhension des objets et de quelle façon le visuel et le toucher sont intimement liés dans le processus de perception. C'est le toucher qui permet de prendre contact avec les spécificités de l'objet, et la main est l'instrument par lequel l'information nous est transmise. La perception passe par les sens, la vision et le toucher sont les modalités les plus utilisées en conception et sont les plus comparables. L'utilisation du toucher dans le processus de conception donne accès à un système perceptif puissant et efficace à cause de sa grande flexibilité et de son haut potentiel de substitution. C'est le concept d'interactivité qui implique les dimensions de communication et d'expression à la base d'échange d'informations et de connaissances. Ce processus permet l'acquisition de connaissances entre deux entités actives.

Nous retrouvons cette interaction entre un individu et un système technologique et dans l'utilisation de systèmes informatiques. Cet échange d'information est une source de connaissance de l'environnement virtuel avec lequel le designer industriel pourrait travailler durant le processus de conception.

## CHAPITRE III

### Les interfaces haptiques

Les interfaces haptiques amènent de nouvelles possibilités dans la compréhension de l'objet virtuel 3D, en utilisant le sens du toucher. Elles s'inscrivent dans l'arrivée de forts gains de puissance des ordinateurs et des dispositifs à retour d'effort. L'utilisateur d'interfaces haptiques peut maintenant manipuler des objets tridimensionnels virtuels grâce à des dispositifs de retour de force et à des logiciels de soutien. Ces interfaces permettent l'accès, par le toucher, à la forme, au poids, aux textures superficielles et à la température (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002).

Les interfaces haptiques peuvent être cernées par cinq caractéristiques principales et ont un impact selon la tâche effectuée.

- 1 L'espace de travail : ses dimensions peuvent varier énormément d'un dispositif à l'autre.
- 2 La dextérité à laquelle l'interface donne accès sous le terme de degrés de liberté (DDL). Cette caractéristique donne la possibilité à l'utilisateur de faire des manipulations de façon naturelle (Horizons, 2003).
- 3 Les forces qui peuvent être ressenties.

Cette caractéristique est importante car elle concerne la sécurité dans le "monde réel" ainsi que la crédibilité du monde virtuel. Si le dispositif peut exercer une force importante, il peut blesser l'utilisateur. Si l'utilisateur sent la forme d'un objet virtuel en voyant ses mouvements contraints par le dessus de sa main, ce n'est pas la même chose que s'il peut sentir ledit objet contre sa paume et sous le bout de ses doigts [...] (Horizons, 2003, p. 1)

- 4 La portabilité ou sa capacité à être déplacée et combinée avec d'autres dispositifs.
- 5 Les contrôles auxiliaires qui permettent de ressentir des forces : la plupart de ceux-ci sont de simples boutons (Horizons, 2003).

Tous ces dispositifs travaillent à faire ressentir des sensations physiques d'objets virtuels de la façon la plus naturelle possible.

Nous examinerons dans ce chapitre les différents systèmes qui reproduisent les sensations tactiles afin de mieux comprendre la technologie haptique.

### **3.1 Les technologies haptiques**

Différentes technologies haptiques existent et elles sont en plein développement. Il y a présentement trois systèmes qui produisent un certain degré de rétroaction : le retour d'effort, le retour tactile et le retour thermique.

#### **3.1.1 Le retour d'effort**

Le terme « *retour d'effort* » est utilisé pour tout système permettant de restituer la sensation du poids (Gradecki, 1994). Il représente les forces qui agissent sur les muscles, les articulations et les tendons (Pimentel et Teixeira, 1994).

On retrouve dans cette catégorie :

- le PHANToM,
- le Virtuose,
- le Freedom,
- le HapticMaster,
- le Impulse Engine,
- les manettes à retour d'effort,
- l'exosquelette,
- le gant de données avec retour d'effort.

## Le PHANToM

Nous nous attarderons un peu plus longuement sur la description du PHANToM, car c'est à partir des recherches faites avec cette interface que nous avons basé toute notre méta-analyse.

Le PHANToM est une interface haptique développée au Massachusetts Institute of Technology (MIT); c'est le premier système haptique commercialisable (Simteam, 2003). Mis au point par Massie et Salisbury et distribué par SensAbles Technologies, le PHANToM est la technologie haptique la plus répandue dans le monde (Lécuyer, 2001). Le système complet comprend l'interface PHANToM, un stylet (figure 3) ou un dé, une alimentation, la connexion et le logiciel GHOST (*General Haptics Open Software*) (Simteam, 2003).



Figure 3 : Le PHANToM<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Simteam, 2003.



Figure 4 : Le PHANTOM Omni<sup>12</sup>

Le PHANTOM a un retour d'effort à six degrés de liberté passifs (ou d'entrée), ce qui correspond aux trois translations et aux trois rotations autour des axes du repère spatial et à trois degrés de liberté actifs (ou de sortie), qui correspondent aux trois forces autour des axes. Le stylet (figure 4), est situé au bout d'un bras contrôlé par un mécanisme à base de moteurs électriques et de câbles. Comme la prise en main d'un crayon, il est familier et d'utilisation évidente (surtout dans la sculpture virtuelle ou la conception 3D) (Lécuyer, 2001).

Le retour haptique du PHANTOM est réservé aux actions réalisées par la main dominante. Le point de pivot d'une scène correspond au dernier objet manipulé et elle peut être déplacée globalement en translation ou en rotation. Les translations sont réalisées avec le bout du stylet dans l'espace, et ces instructions sont directement utilisées pour le déplacement de l'objet virtuel. L'orientation de celui-ci reste la même. La rotation pure est basée sur la technique d'interaction haptique où une

---

<sup>12</sup> SensAble, 2003.

sphère virtuelle est matérialisée autour de l'objet manipulé. L'extrémité du stylet doit rester à la surface de cette sphère. La position ainsi que les mouvements servent à définir un angle et un vecteur de rotation appliqué directement à l'objet. Celui-ci n'est pas restitué directement à cause de la fatigue qu'aurait occasionnée un poids constant durant la manipulation.

La simulation de poids a été traitée en effet d'inertie sur une masse virtuelle attachée à l'extrémité du stylet. Lors d'un choc entre un objet manipulé et un objet fixe dans l'environnement virtuel, la force de réaction est restituée à l'opérateur directement dans le sens et la direction normale de la surface de contact.

Les avantages du PHANToM sont :

- la haute fidélité de son retour haptique 3D (précision);
- la possibilité qu'il offre de travailler dans un environnement de bureau (dimension);
- sa compatibilité aux standards PC et Unix;
- il améliore les performances des sujets en temps d'exécution de la tâche (Lécuyer, 2001).

Le PHANToM possède quelques inconvénients comme :

- un grand espace de travail, qui rend *a priori* difficile l'utilisation de périphériques haptiques à base fixe *versus* les systèmes portables;
- le calcul et la modélisation des forces de retour dans un environnement virtuel, qui posent un certain nombre de problèmes informatiques;
- le rendu haptique, qui se complique avec la prise en compte d'éléments tels que la définition géométrique des objets virtuels (objets polyédriques, Nurbs, etc.), le caractère déformable ou non, les effets haptiques à simuler (frottement, texture, etc.) ou, encore, la nature statique ou dynamique de la simulation;
- la précision, qui peut diminuer la vitesse d'exécution (Lécuyer, 2001).

Le logiciel Ghost permet la compréhension rapide des fonctions de retour d'effort associées aux logiciels existants (Simteam, 2002). C'est une librairie commerciale écrite en C++, utilisée pour le développement d'applications interactives à retour

d'effort; elle a été conçue pour libérer les développeurs des problématiques bas niveau (force et dispositif) afin qu'ils puissent se concentrer sur la création de scènes virtuelles. Ce logiciel représente l'environnement haptique comme une hiérarchie d'objets géométriques et d'effets spatiaux.

Le Ghost SDK fournit les retours d'effort suivants :

- le retour statique permettant à l'opérateur de sentir la forme, la rigidité et la friction associées à la géométrie 3D;
- le retour dynamique permettant au programmeur de lier un « comportement » (voir ci-dessous) à un élément virtuel; des formes restreintes de comportements sont également fournies, tels que les types boutons et *sliders*;
- le retour de manipulation fournissant des effets spécifiques quand l'opérateur redimensionne, tourne ou déplace un objet;
- le retour spatial générant des forces qui ne sont pas directement associées à un objet virtuel. (Horizons, 2003).

Une description plus complète des caractéristiques techniques se retrouve à l'annexe A.

### **Le Virtuose**

Le Virtuose est semblable et concurrent au PHANTOM, c'est une interface composée d'une structure mécanique de type robot manipulateur. Il existe deux modèles, le Virtuose 3D (retour d'effort de trois degrés de liberté, figure 5) et le Virtuose 6D (retour d'effort de six degrés de liberté, figure 6) (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).

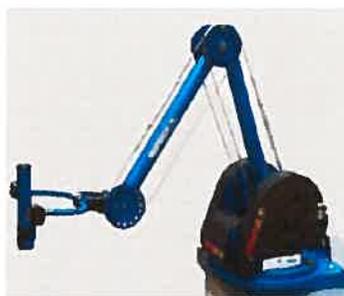


Figure 5 : Le Virtuose 3D<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Source : Le Virtuose 3D, 2003.



Figure 6 : Le Virtuose 6D<sup>14</sup>

### Le Freedom

Cette interface est basée sur des mouvements de translations (trois degrés de liberté) équilibrés dynamiquement et les rotations sont transmises par câbles (figure 7) (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 7 : Le Freedom<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Source : Innovation et avantage concurrentiel de l'offre d'Haption, 2003.

<sup>15</sup> Source : Virtual Realty Platform-PRV, 2003.

## Le HapticMaster

Le HapticMaster (figure 8) est un système à retour d'effort à six degrés de liberté muni d'un mécanisme basé sur trois pantographes<sup>16</sup> (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 8 : Le HapticMaster<sup>17</sup>

## Le Impulse Engine

Cette interface permet de simuler la manipulation de l'outil chirurgical. Le Impulse Engine (figure 9) reproduit la compliance<sup>18</sup>, la viscosité et la texture de surface. Les outils peuvent évoluer sur cinq degrés de liberté (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 9 : Le Impulse Engine<sup>19</sup>

<sup>16</sup> Instrument constitué de tiges articulées, destiné à reproduire, à agrandir ou à réduire mécaniquement un dessin. (Antidote 2000)

<sup>17</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003.

<sup>18</sup> Aptitude d'une cavité organique à changer de volume sous l'influence d'une variation de pression. (Vocabulaire de la santé, 2003)

<sup>19</sup> Source : Laparoscopic Impulse Engine, 2003.

## Les manettes à retour d'effort

Pour le grand public, il existe différentes manettes ou *joystick* à retour d'effort de qualité déficiente.

Pour les professionnels, les manettes à retour d'effort sont des interfaces peu encombrantes; elles ont au moins trois degrés de liberté et un petit espace de travail (quelques centimètres) comme le Immersion stick (figure 10 ) et le Haptic Magnetic Levitation (figure 11) (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).

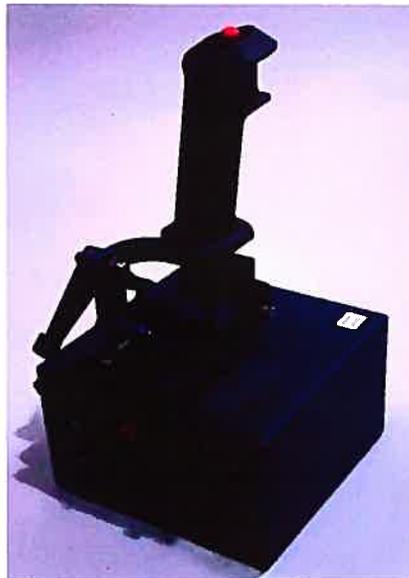


Figure 10 : Le Impulse Engine 2000<sup>20</sup>



Figure 11 : Le Haptic Master<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003.

<sup>21</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003.

## L'exosquelette

C'est un système de retour de force (figure 12) construit à partir d'une mécanique faite de moteurs et d'un exosquelette<sup>22</sup>. Ce système permet de se mouvoir et c'est l'exosquelette qui produit un certain degré de résistance à tous les mouvements, conformément à la nature de l'objet manipulé.

On l'utilise dans la saisie d'un objet, afin de déterminer s'il est lourd ou léger, dur ou mou, pour donner une résistance à des matériaux comme l'eau et afin de résister à des objets solides, comme un mur (Gradecki, 1994).

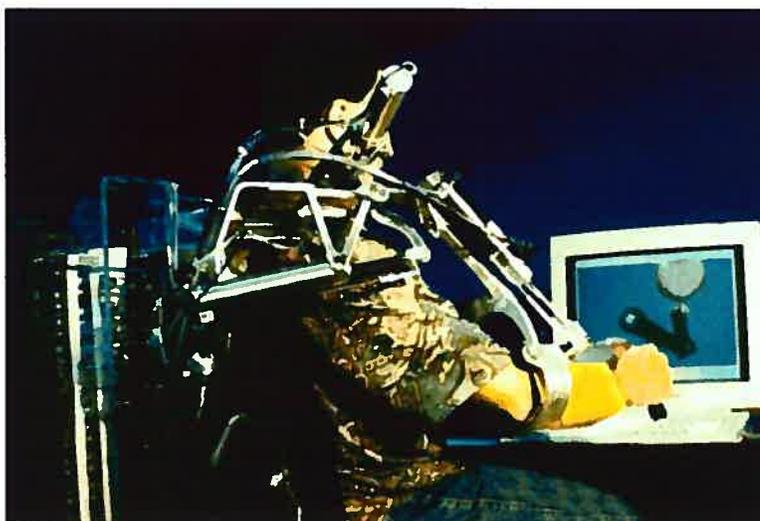


Figure 12: L'exosquelette<sup>23</sup>

## Les gants de données avec retour d'effort

Les Rutgers Master I et II utilisent des vérins mécaniques fixés sur la paume de la main afin d'exercer une force sur chaque doigt. Ils permettent la manipulation d'objets déformables (figure 13) (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).

---

<sup>22</sup> Structure portée à l'extérieur du corps, qui s'ajuste au bras et à la main afin de pouvoir effectuer des mouvements normaux.(Antidote 2000)

<sup>23</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003.

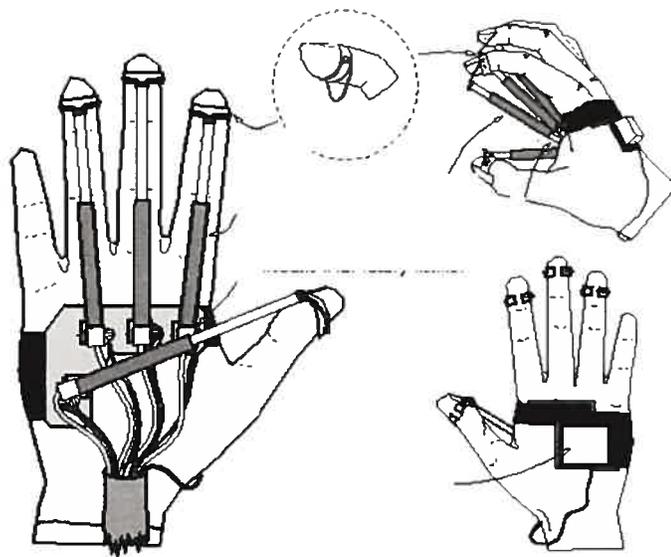


Figure 13 : Rutgers Master <sup>24</sup>

Le Cybergrasp (figure 14) est un exosquelette qui permet d'ajouter à un gant de données (cyberglove) un retour d'effort à chaque doigt. Ces retours sont programmables individuellement. Le Cybergrasp a été adapté pour être mobile grâce au Graspack (figure 14), qui permet à l'utilisateur de se mouvoir dans un environnement virtuel et de travailler avec les deux mains (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 14 : Cybergrasp<sup>25</sup> et Graspack<sup>26</sup>

<sup>24</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003.

<sup>25</sup> Source : Immersion Corporation, 2003

<sup>26</sup> Source : Immersion Corporation, 2003

### 3.1.2 Le retour tactile

*Le retour tactile* fournit au cerveau les informations nécessaires afin qu'il détermine avec quel objet la main est en contact (Gradecki, 1994). Il fait référence aux forces agissant sur la peau (Pimentel et Teixeira, 1994).

Les éléments concernant le retour tactile sont :

- la peau, qui se conforme à la surface de tout objet avec lequel elle entre en contact;
- les mécanorécepteurs, qui réagissent électriquement au contact;
- les impulsions, qui varient de 50 à 100 millivolts;
- leur durée, qui est d'une milliseconde;
- elles peuvent se produire jusqu'à 500 fois par seconde (Pimentel et Teixeira, 1994).

Il existe différents systèmes pour fournir le stimuli à la main :

- le retour tactile pneumatique;
- le retour tactile à matrice d'aiguilles;
- le retour tactile par vibrations;
- le retour tactile par manette :
- le retour tactile par électrodes cutanés.

Les différentes interfaces à retour tactile sont présentées ci-dessous.

#### **Le retour tactile pneumatique**

Il existe le retour tactile obtenu par de minuscules ballons gonflables qui se trouvent dans un gant (figure 15). Les ballons sont gonflés de manière à simuler la sensation du contact lors de la préhension d'un objet (Gradecki, 1994).

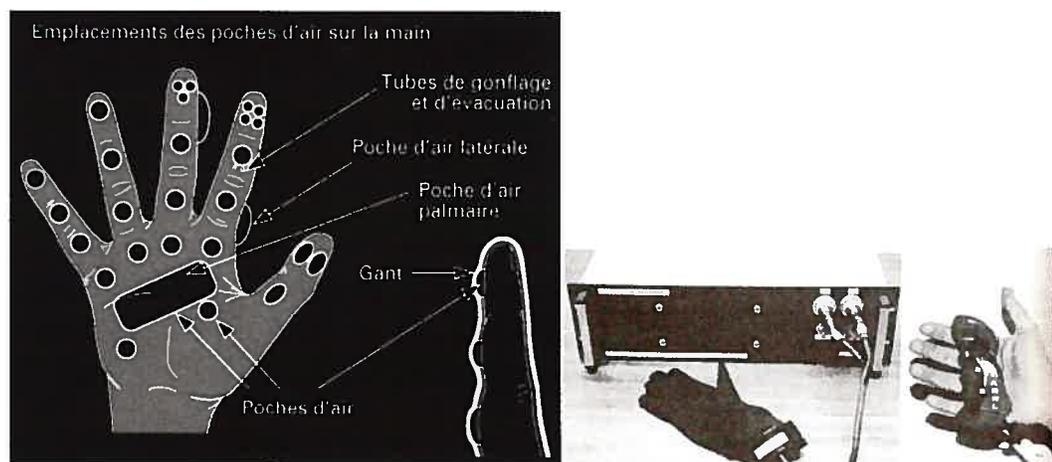


Figure 15 : Le retour tactile pneumatique<sup>27</sup>

### Le retour tactile à matrice d'aiguilles

Ce type de retour simule plusieurs points de contact sur un seul doigt à l'aide d'aiguilles (figure 16) suffisamment fines qui stimulent une petite partie de la peau avec une faible force (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 16 : Le retour tactile à matrice d'aiguilles<sup>28</sup>

### Le retour tactile par vibrations

La simulation tactile peut aussi être obtenue par de petits transducteurs vibrants (figure 17), qui répondent presque instantanément à un signal (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).

<sup>27</sup> Groupe de recherche en arts médiatiques, 2003 et Pimentel et Teixeira, 1994, p. 304.

<sup>28</sup> Source : Haptic Photo Gallery, 2003



Figure 17 : Le retour tactile par vibrations<sup>29</sup>

### Le retour tactile par manette

Les manettes, ou *joystick* (figure 18), permettent à l'utilisateur de ressentir les mouvements qui sont commandés à la manette. Les sensations tactiles à faibles variations comme la rugosité, la viscosité sont des retour tactile et les stimuli plus importants sont classés dans les interfaces à retour d'effort (Fuchs, Moreau et Papin, 2001).



Figure 18 : Le retour tactile par manette<sup>30</sup>

---

<sup>29</sup> Source : Simteam, 2003.

<sup>30</sup> Source : Logitech, 2003

### Retour tactile par électrodes cutanées

Ce système transmet des courants électriques aux différents capteurs cutanés, ils restent en contact constant avec la peau

#### 3.1.3 Le retour thermique

La température est un des signaux de rétroaction fondamentale que produisent la main et les doigts. Le système de retour thermique (figure 19) permet de chauffer une partie du corps à l'aide d'une petite thermode (élément constitué d'une pompe à chaleur, d'un capteur de température et d'une sonde à chaleur) (Gradecki, 1994).



Figure 19 : Le retour thermique<sup>31</sup>

### 3.2 Le rendu haptique

C'est le rendu haptique qui transmet à l'utilisateur « des forces représentant un objet ou une scène virtuelle par une interface haptique » (Horizons, 2003, p. 1). Le degré d'immersion de l'utilisateur doit donner à celui-ci une perception sensorielle optimale avec la scène virtuelle par rapport aux applications visées (Lécuyer, 2001). La figure 20 illustre les informations d'un système haptique classique comme le PHANToM.

Dans ce système, l'utilisateur transmet son action à la simulation via les capteurs du périphérique (les encodeurs optiques du PHANToM). Le moteur de la simulation calcule l'amplitude et la direction de la force de réaction. Cette force est directement renvoyée par l'interface haptique vers l'utilisateur. (p. 96)

---

<sup>31</sup> Source :IBM, 2003.

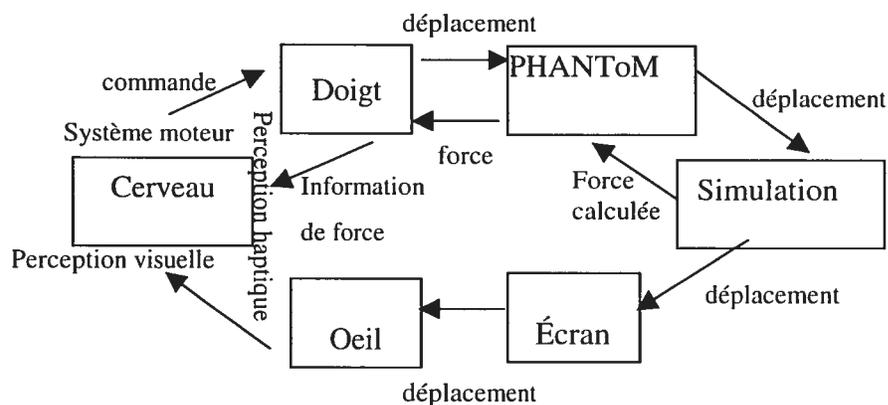


Figure 20 : Le rendu haptique<sup>32</sup>

Le principe de base derrière le rendu haptique est que chaque milliseconde, l'ordinateur qui contrôle le PHANTOM lit les joints encodeurs pour déterminer la position exacte du stylet. Il compare alors cette position à ceux des objets virtuels que l'utilisateur essaie de toucher. Si l'utilisateur est loin de tous les objets virtuels, un voltage zéro est envoyé aux moteurs et l'utilisateur est libre de déplacer le stylet comme s'il explorait un espace vide. Cependant, si le système détecte une collision entre le stylet et un objet virtuel, les moteurs seront sollicités afin de manifester à la main de l'utilisateur, à travers le stylet, une force normale sur la surface pénétrée. Lorsque l'utilisateur agit ou déplace le stylet, des capteurs (de position ou de force) mesurent la nouvelle configuration périphérique, et la nouvelle position des objets virtuels est calculée et simulée. Le réalisme du rendu haptique est défavorablement affecté par la mise à jour d'un modèle en temps réel, spécialement quand on parle d'objet déformable (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002). Le moteur virtuel calcule les forces de réaction aux chocs quand une collision est détectée; la force de réaction est alors éventuellement modifiée pour tenir compte des effets recherchés ou de la texture de la surface des objets rencontrés (Lécuyer, 2001).

Pour le PHANTOM, les possibilités dans le rendu haptique sont les suivantes :

- la détection de collisions;

<sup>32</sup> Source : Lécuyer, 2001, p. 97.

- l'intersection de surfaces complexes de modèles 3D;
- il peut tester des facteurs humains;
- il peut créer des maquettes virtuelles : simulation en temps réel de l'ergonomie (commutateurs, boutons);
- il permet l'assemblage virtuel du plan de maintenance (*snap-fit*);
- il permet l'analyse de la fabrication (faisabilité) et de la procédure d'assemblage;
- il permet l'évaluation de la forme et son ajustement (SensAble, 2002).

Le rendu haptique donne différentes possibilités d'action dans le monde virtuel et c'est par elles que nous allons comprendre comment la perception haptique est transmise à l'utilisateur.

### **3.3 Les applications**

En ce qui a trait au PHANTOM, il est utilisé dans différentes sphères de la vie où le toucher revêt une importance quant à l'action à accomplir.

On l'emploie dans les domaines suivants :

- le design;
- l'industrie : pour la télé-opération, la simulation du geste technique, la visualisation de données complexes et l'interaction avec des produits virtuels;
- l'analyse de données;
- la médecine : pour la simulation et la planification d'opération, pour l'assistance pendant des opérations et comme aide aux personnes malades ou handicapées;
- le divertissement : avec les jeux vidéos, les parcs thématiques et le cinéma;
- les musées;
- les arts comme la peinture, la sculpture et la musique;
- les applications militaires;
- l'éducation et les sciences : il permet de ressentir les phénomènes physiques à différentes échelles.

En design industriel, les interfaces haptiques suscitent un intérêt quant aux perspectives de leur utilisation dans le processus de conception. Le tableau I permet de mieux comprendre comment ces applications sont utiles dans le monde industriel.

Tableau I

Les applications et les besoins du retour haptique dans le monde industriel<sup>33</sup>

| <i>Application</i>                | <i>Besoins</i>   | <i>Apports du retour haptique</i>  |
|-----------------------------------|--|--|
| Prototypage virtuel <sup>34</sup> | Aide pendant la définition / conception.                                   | Déformation et sculpture 3D, positionnement des éléments sans interférence, sentir les surfaces ou les contours des pièces, notion de tolérance. |
| Visualisation                     | Faciliter la compréhension de données complexes et de résultats de calcul. | Perception des forces, des informations énergétiques, des lignes de potentiel, des trajectoires 3D.  |
| Vérification d'opération          | Vérification d'accessibilité aux pièces (outils, mannequins, mains).       | Chocs, chemins d'accès, trajectoires ou volumes générés.   |
|                                   | Assistance pendant l'opération.  | Sensations de force, de gravité, collisions.   |
|                                   | Manutention d'outillage.   | Couples (vissage, pince, etc.), forces (insertions, outillage spécifique, etc.).   |
|                                   | Analyse ergonomique.   | Sécurité (chocs), supportabilité des efforts, etc.   |
| Formation                         | Réalisme de la simulation.   | Restitution d'échelle, sentir l'espace, les composants, la dynamique des objets, les mécanismes, etc.  |

### 3.4 Les recherches

Il se trouve de nombreuses expérimentations à travers le monde qui utilisent la technologie du PHANTOM. C'est par les différentes applications du PHANTOM que se développent les recherches et les possibilités de cette interface haptique.

<sup>33</sup> Source : Lécuyer, 2001, p. 97.

<sup>34</sup> Mode de conception par raffinement de prototypes artificiels créés par un ordinateur. Simulé (Dictionnaire francophone de l'informatique, 2003).

Dans le milieu médical, le PHANTOM a permis d'expérimenter le dessin 3D avec une interaction directe; ce qui a engendré des possibilités de simulation des actes médicaux (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002).

Iwata, Yano et Hashimoto (1997) ont élaboré un simulateur chirurgical avec un tissu de forme libre qui peut se couper comme un vrai tissu humain. À l'Institut de robotique de l'Université de Carnegie Mellon, un système de simulation de chirurgie arthroscopique utilise le PHANTOM pour produire un outil chirurgical servant une formation plus réaliste aux médecins, de sorte que la personne inexpérimentée peut ressentir les contacts involontaires avec des ligaments et des membranes fibreuses (Mor, 1998). Les chercheurs Aviles et Ranta (1999) ont développé, pour Novint Technologie, un simulateur dentaire qui imite des instruments dentaires, lesquels servent à explorer des matériaux durs comme l'émail (Aviles et Ranta, 1999; McLaughlin, cité dans Hespanha et Sukhatme, 2002). À Stanford, Balaniuk et Costa (2000) ont développé des systèmes de simulation d'objets remplis de liquide adaptés pour la déformation interactive, en coupant et en suturant.

Par ailleurs, quelques musées explorent l'utilisation de numérisation 3D d'artefacts, d'objets, de sculptures et même de tableaux, afin de faire profiter les visiteurs d'une exploration tactile. On voit même poindre des visites virtuelles à distance en temps réel où plusieurs personnes pourraient conjointement examiner la même pièce, ainsi que des projets d'expositions virtuelles avec des interfaces haptiques pour la peinture, la sculpture, et la CAO (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002). L'Université de Californie du Sud a utilisé le PHANTOM au Musée d'histoire naturelle de Los Angeles pour présenter une exposition virtuelle juxtaposée à une exposition réelle. Ces expériences portaient sur la distinction des formes, des contours et des textures (ex. : bord déchiqueté d'un vase) (Lazzari et coll., 2001).

En Suède, au Certec, Sjöstrom et coll. (1997) ont permis aux handicapés visuels de faire de la peinture grâce au PHANTOM. Le retour de force a été utilisé pour faire varier l'épaisseur des lignes et des couleurs; celles-ci ayant chacune leur profil au niveau tactile.

Gutierrez et coll. (1998) ont développé le *Dantum*, un modèleur géométrique (intégré au PHANToM) qui permet de toucher, bouger, attraper, assembler et désassembler des objets.

Chez Interval Research Corporation, Snibbe, Anderson et Verplank (1998) ont mis au point un prototype, le *Dynasculpt*, qui permet de sculpter en 3D. Une masse virtuelle est attachée au PHANToM et un ruban est construit autour de l'espace 3D selon la position virtuelle du stylet. La texture superficielle peut être rendue de façon tactile par des techniques comme la perturbation de force, où la direction et l'ampleur du vecteur de force sont employées pour simuler des effets (ex.: la dureté).

Il y a beaucoup d'études qui se rapportent au système haptique humain portant sur les dimensions significatives d'identification d'objets, incluant la texture, la dureté, la forme et la conductibilité thermique. La plupart des chercheurs disent que les sujets sont capables de distinguer les textures et les formes plutôt petites par le toucher seulement. Berger et Hatwell (1993, 1995) ont évalué différents sujets concernant des échantillons de texture, plus spécifiquement la densité et les dimensions de dureté. Les sujets plus vieux étaient moins capables que les plus jeunes de faire une évaluation globale des stimulus et d'invoquer les dimensions séparées comme des critères de jugement (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002). Huges et Jansson (1994) notent que les textures peuvent être multidimensionnelles et que les variations des dimensions se retrouvent dans la taille, la hauteur et la forme des éléments. Ils évaluent le contact actif (mouvement constant de la surface de la peau sur la surface d'un objet) comme une manière plus précise que la vision de percevoir certaines propriétés comme la douceur, quoi qu'il soit moins approprié pour juger de la dureté (McLaughlin, Hespanha et Sukhatme, 2002). Srinivasan et Basdogan (1997) ont simulé des textures virtuelles, comme le bois, le papier sablé, le pavé de pierre et le plastique, en employant des fonctions mathématiques. Ikei, Wakamatsu et Fakuda (1997) ont créé des textures à partir d'images 2D converties avec l'échelle des gris intensifiés par la brillance et le contraste. C'est le degré et la distribution d'intensité qui correspondent aux variations dans la hauteur des saillies de texture et des rétroactions.

Dillon et coll. (2000) ont étudié et développé un langage des tissus afin d'analyser leurs propriétés tactiles, et ils utilisent ces informations pour interpréter les sensations amenées par l'interface haptique. Toutes ces recherches ont servi à développer le toucher haptique virtuel afin de le rendre accessible dans de nombreuses utilisations. La demande est de plus en plus forte pour une interaction physique avec le monde virtuel, aussi bien dans le milieu professionnel de la maquette numérique que dans le domaine du jeu grand public.

### 3.5 Conclusion

Les interfaces haptiques permettent d'utiliser le puissant sens du toucher afin d'augmenter la quantité d'informations transmises entre l'utilisateur et la machine. Elles permettent d'utiliser les sensations tactiles pour arriver à mener à bien des tâches virtuelles et ainsi diriger des manipulations plus efficacement.

Finalement, les applications du toucher 3D permettent de travailler de manière plus productive, plus agréable et plus habile. Différentes technologies haptiques sont en plein développement, comme le retour d'effort, le retour tactile et le retour thermique. Le PHANTOM est une interface haptique qui a été développée au MIT par Massie et Salisbury et qui est distribuée par SensAble Technologies. C'est la technologie haptique la plus répandue au monde. La recherche liée au développement des interfaces haptiques est concernée par le développement, la mise au point et le raffinement des perceptions tactiles. Les dispositifs haptiques se spécialisent dans la détection de collisions, du retour de force et de la compression.

De nombreuses recherches ont déjà eu lieu avec l'interface haptique PHANTOM dans différentes universités, et son usage est déjà répandu dans certains domaines comme la médecine, le divertissement, les musées, les arts, l'éducation, les sciences et les applications militaires. Dans le domaine du design industriel, très peu de recherches ont été réalisées. Cependant, le potentiel de cet outil dans le processus de conception, en ayant recours au modelage virtuel ou aux avantages du toucher en création dans un environnement virtuel, est en progression.

Les interfaces haptiques sont en pleine expansion et l'on commence à peine à découvrir leurs différentes applications. Les possibilités de toucher à un modèle virtuel sont une source d'intérêt pour plusieurs chercheurs et le design industriel est une discipline qui ne peut que profiter du développement de cet outil.

## CHAPITRE IV

### La méta-analyse comme soutien à notre hypothèse

Pour dégager des pistes novatrices d'utilisation de la technologie du toucher 3D et afin de comprendre comment l'interactivité tactile provoquée par l'utilisation d'une interface haptique peut avoir un impact sur la conception, notre cheminement nous a amenée à opter pour une méta-analyse. Cependant, nous croyons nécessaire de spécifier que de nombreuses démarches ont été effectuées afin d'avoir accès à cette technologie, mais, à cause de sa rareté, de son coût et de son peu de disponibilité, nous n'avons pu effectuer d'expérimentations. Le choix du PHANTOM, comme interface à étudier, s'est imposé à cause des nombreuses expérimentations récentes qui ont déjà été réalisées et de l'accessibilité à celles-ci. En design industriel spécifiquement, très peu d'études ont été réalisées, et c'est à travers l'analyse de l'utilisation de l'interface haptique dans différents domaines scientifiques que nous avons élaboré notre collectes d'informations. Nous avons opté pour une méta-analyse conceptuelle basée sur des critères qui exploiteront les possibilités développées par le PHANTOM dans le domaine de la perception tactile. À travers cette méta-analyse, nous serons à même de mieux comprendre quelles informations l'interface haptique nous communique et la pertinence de son utilisation par le designer industriel.

#### 4.1 La méthodologie

La méta-analyse est une méthode quantitative qui se sert de l'information contenue dans certaines études afin d'établir des conclusions précises sur un sujet particulier. En 1976, Glass utilise pour la première fois le terme « méta-analyse » pour faire référence à l'analyse statistique de différentes études dans le but d'intégrer les résultats (Glass, 1976). La méta-analyse a pour but de résumer un domaine de recherche afin de mieux orienter les recherches futures (Glass, 1976; cité dans Morin, 1987). Il existe des méta-recherches (ou méta-analyses) de deux ordres : statistique et conceptuel (Van der Maren, 2002).

La méta-analyse est une technique statistique qui rassemble les conclusions de plusieurs études indépendantes. Les résultats de chaque étude sont convertis sous forme d'une mesure commune afin d'en permettre la comparaison. (Gates, Dowden et Brown, 2003, p. 1)

L'analyse conceptuelle sert à identifier, extraire et décrire des connaissances dans les textes. C'est une technique quantitative servant à faire du recensement de la documentation empirique (Haccoun, 1999). Selon Green et Hall (1984), l'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'examiner plus d'études dans un temps moindre à l'aide d'un système de codification, et d'analyser de nouvelles hypothèses qui n'ont jamais été testées par des études individuelles (Green et Hall, 1984; cité dans Morin, 1987). Cette méta-analyse nous permettra de faire le point sur l'état actuel des interfaces haptiques afin de répondre à notre questionnement.

Une méta-analyse s'appuie sur une approche rigoureuse, laquelle comprend les étapes suivantes :

1. **La problématique** (la détermination du problème à méta-analyser);
2. **L'objectif** (la détermination des objectifs);
3. **L'hypothèse** (l'établissement de l'hypothèse);
4. **L'explication des objectifs** (la clarification des objectifs);
5. **Les sources** (la mention des sources);
6. **Les critères de sélection des textes** (la détermination des critères de sélection et du tri des études c'est-à-dire des critères d'inclusion et d'exclusion);
7. **Le processus d'analyse** (l'analyse et l'interprétation des données en tenant compte du caractère des données à l'intérieur des études);
8. **Les conclusions** (les conclusions relatives à la réalisation des buts et des objectifs de l'étude méta-analytique, tels que fixés au départ);
9. **La bibliographie** (la bibliographie complète des études choisies);
10. **Les données de référence** (les données de référence à des fins de comparaison éventuelle du produit de la méta-analyse) (Jenicek, 1987).

Cette méthodologie est soutenue par l'utilisation du logiciel Atlas.ti pour nous permettre de gérer et d'analyser toutes les données.

La méta-analyse constitue un moyen de synthétiser un nombre considérable d'informations dans un domaine. Ce constat est des plus importants, puisque les conclusions tirées de la méta-analyse orienteront les recherches futures. (Shapiro et Shapiro, 1982; cité dans Morin, 1987, p. 29-30)

#### **4.1.1 La problématique**

Dans cette analyse, la problématique étudiée cherche à comprendre le toucher haptique et l'interactivité créée par l'utilisation du PHANToM afin de percevoir et de comprendre comment l'utilisation de l'interface haptique permet d'avoir accès à des informations tactiles.

#### **4.1.2 Les objectifs**

- 1– Comprendre quelles informations sont apportées par la technologie haptique et comment celles-ci peuvent influencer un processus de design industriel.*
- 2– Comprendre la différence entre le toucher physique et celui que procure une interface haptique.*

#### **4.1.3 L'hypothèse**

*L'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.*

#### **4.1.4 L'explication des objectifs**

L'objectif de la présente étude est d'utiliser la technique méta-analytique pour intégrer les résultats de recherches empiriques afin de découvrir quelles informations sont apportées par la technologie haptique et aussi comprendre la différence entre le toucher physique et celui que procure une interface haptique. Ces informations seront étudiées dans les différentes recherches où l'interface haptique PHANToM a été utilisée.

#### **4.1.5 Les sources**

Nous utiliserons les expériences réalisées avec l'interface haptique PHANToM dans différents contextes d'applications et celles appartenant à diverses perspectives épistémologiques. L'information provient de différentes sources de documents comme des livres, des mémoires et des thèses, des articles de revues et des travaux publiés. Les observations sur cette interface haptique et son fonctionnement, la qualité du rendu haptique, les avantages et les inconvénients et son utilisation dans différents domaines nous permettront de comprendre comment l'interface haptique favorise le contact avec les objets virtuels et la réception de l'information. L'analyse des expériences faites avec l'interface haptique PHANToM permettra de limiter l'ampleur de cette étude. La majorité de celles-ci sont de type processus-produit, où les expérimentations sont mises en relation avec les performances de l'interface.

#### **4.1.6 Les critères de sélection des textes**

Pour ce travail, nous avons utilisé des recherches publiées de façon exhaustive avec les résultats de recherche et la méthodologie. Les recherches employées débutent en 1994 avec l'avènement du PHANToM dans les laboratoires du MIT avec Massie et Salisbury. Depuis, plusieurs chercheurs ont utilisé cette technologie et, chaque année depuis 1996, un symposium a lieu sur les travaux faits avec le PHANToM.

Dans cette méta-analyse, les recherches qui ont été retenues portent sur la perception tactile; plus précisément, celles qui ont trait à plusieurs aspects du toucher, de la compréhension du modèle 3D, des recherches qui se penchent sur l'apport du toucher dans l'utilisation de la modélisation 3D ainsi que sur le fonctionnement de la technologie haptique. C'est le choix des variables qui oriente la nature de la recherche, elles doivent permettre de trouver des sources de documentation.

Les études répondant aux critères suivants ont été retenues :

- contenir des informations qui définissent les objets virtuels 3D comme le contour (limites extérieures, frontières), la structure (la disposition et les arrangements des

parties), le rythme (éléments à intervalles réguliers doués d'une fonction esthétique, harmonique et/ou fonctionnelle), le volume (forme de type tridimensionnel), le poids (répartition des masses), la texture (finis de surface) et la sensation (émotions perçues);

- contenir des expérimentations qui amènent de l'information qualitative sur les sensations perçues par les interfaces;
- contenir une compréhension de l'utilisation et du fonctionnement de la technologie haptique.

Les thèmes généraux qui ont guidé cette recherche sont :

*1– le design industriel (le modèle 3D);*

*2– la perception (l'interaction haptique, la perception haptique et la perception visuelle et la reconnaissance de l'objet);*

*3– la technologie haptique (les interfaces haptiques, le rendu haptique et la texture).*

Le choix de ce vocabulaire est rattaché à l'atteinte de nos objectifs qui sont d'avoir une compréhension générale des interfaces haptiques pour mieux évaluer leurs implications possibles dans le monde de la conception en design industriel.

Dans le choix des études, il existe peu de différences, selon Glass (1976), quant aux résultats entre celles qui utilisent une très bonne méthodologie et celles qui ne le font pas. Si l'on écarte les études mal construites, on se départit d'une grande quantité de données importantes. Selon cet auteur, il n'y a pas de critères objectifs qui permettent d'établir des jugements de qualité de la méthodologie (Glass, 1976; cité dans Morin, 1987).

Landman et Dawes (1982) étaient aussi en désaccord avec la méthodologie utilisée par Smith et Glass (1977), ils ont donc repris l'étude sur la méta-analyse de l'efficacité des psychothérapies en excluant les études qui, selon eux, ne rencontraient pas les critères méthodologiques qu'ils s'étaient fixés.

Avec un échantillon moindre, ils ont obtenu les mêmes conclusions que Smith et Glass, et ce, même en ayant introduit des critères de qualité. (Landman et Dawes, 1982 et Smith et Glass, 1977 cité dans Morin, 1987, p. 26)

La méta-analyse utilise les recherches déjà effectuées et veut tendre vers un procédé objectif. Ces recherches peuvent induire des biais scientifiques, car plusieurs auteurs s'entendent sur le fait qu'il y a une tendance à publier les études ayant des résultats positifs et une surestimation de l'importance de l'effet (Strube et Hartman, 1983; Kraemer et Andrews, 1982; Johnson et Baumeister, 1978; cité dans Morin, 1987, p. 28). Cette méta-analyse nous permettra une comparaison de nombreuses recherches sur l'utilisation de l'interface haptique PHANToM dans différents domaines d'application et dans différents laboratoires, ce qui mènera à un meilleur équilibre de la qualité de l'objectivité des résultats.

Pour déterminer le corpus, nous avons consulté différentes sources de données et nous avons sélectionné les recherches qui correspondaient aux critères précédemment cités. Nous avons utilisé comme descripteurs dans notre recherche bibliographique ceux qui sont présents dans les articles sur ce sujet (en grande majorité en anglais) : *PHANToM*, *haptic*, *haptic interfaces*, *haptic perception*, *haptic exploration*, *haptic technologies*.

Nous avons ainsi repéré plus de 97 articles et rapports de recherche où le PHANToM était utilisé et qui correspondaient à des recherches qui, par leurs titres et leurs sommaires, pouvaient satisfaire nos critères de sélection. Une première sélection a été faite sur la base de l'étude des résumés, 68 articles et rapports de recherche ont été retenus. Après une première lecture, 17 recherches ont été éliminées à cause de leur contenu trop pointu et ne correspondant pas à nos visées, c'est-à-dire que ces études ne portaient pas sur les caractéristiques des objets, sur les informations qualitatives des sensations ou sur la compréhension générale des interfaces haptiques.

Les recherches retenues (annexe B) ont, par la suite, été classées en trois niveaux de pertinence, soit : 1) les textes considérés comme très pertinents; 2) les textes qui correspondaient à certains de nos critères; 3) les textes peu pertinents, qui s'éloignaient beaucoup de nos critères.

Ce classement a permis de déterminer un ordre d'analyse et de traiter en premier lieu les recherches qui portaient plus spécifiquement sur le sujet d'étude (Gauthier et coll., 1997). De ce tri, les 24 recherches les plus pertinentes ont été retenues.

#### **4.1.7 Le processus d'analyse**

Afin de cerner le sujet de notre recherche, nous avons procédé à l'analyse des études retenues. Le logiciel d'analyse de contenu Atlas.TI a été utilisé pour le traitement des informations. Ce logiciel facilite la manipulation et le codage de données, en rendant leur analyse plus efficace que la méthode manuelle afin de dégager des conclusions plus fiables (Gauthier et coll., 1997).

À partir des textes, une première liste de 293 citations a été produite à partir de Atlas.TI. Ces énoncés sont des segments de texte correspondant à une idée, un concept qui est porteur de notre projet (A.Q., 2002). Ensuite, nous avons codé, c'est-à-dire associé, un mot ou une expression simple à une citation. Ainsi, nos citations ont été distribués dans 61 codes.

Une fois cette liste produite, nous avons procédé à une étape de reformulation des codes. Cette étape s'imposait parce que plusieurs énoncés, tirés de textes différents, avaient une signification semblable, mais une expression différente. De nouvelles catégories ont été élaborées afin de dégager de nouvelles sous-catégories – celles qui semblaient revenir le plus souvent, tout en étant assez englobantes. C'est ainsi que la grille d'analyse a été précisée pour comporter neuf catégories. Nous avons réparti les 61 codes dans les neuf catégories suivantes pour regrouper les renseignements nécessaires à la compréhension du domaine étudié.

Tableau II  
Le regroupement des codes en catégories

| Codes des énoncées   | Catégories   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• application • assemblage • design industriel • observation • modèle 3D</li> <li>• utilisation</li> </ul>  | 1- les applications (le design industriel, le modèle 3D et l'assemblage)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• conformité • discrimination • forme</li> <li>• grosseur / grandeur • interaction haptique/visuel • perception</li> <li>• perception forme • perception haptique visuelle • temps réel</li> </ul>  | 2- la perception (de la forme, haptique et visuelle et la reconnaissance de l'objet)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• algorithmes • avantages haptiques</li> <li>• besoin • compréhension haptique</li> <li>• problème haptique • reconnaissance objet • rendu haptique • saisie haptique</li> <li>• simulation haptique • succès haptique</li> <li>• technologie haptique</li> </ul> | 3- la technologie haptique (la compréhension haptique, le rendu haptique, les limites haptiques, les problèmes haptiques et les algorithmes) |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• collision • modèle déformable • objet déformable • pénétration</li> </ul>   | 4- les collisions (la pénétration et les objets déformables)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• friction • ombre • rugosité • texture</li> <li>• texture surface • texture / 2D</li> <li>• texture / douceur</li> <li>• texture / douceur / comparaison visuel-haptique • texture / friction</li> <li>• texture / maths</li> </ul>                              | 5- la texture (la rugosité, la friction, le lisse et le 2D)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• aspects humain / interface • interface</li> <li>• interaction avec deux utilisateurs</li> </ul>   | 6- les interactions haptiques (les aspects humains, physique et entre utilisateurs)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• interface critère • interface haptique</li> <li>• limites haptiques</li> </ul>  | 7- l'interface (l'interface haptique et les critères)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• ghost • PHANToM • PHANToM applications • PHANToM avantages</li> <li>• PHANToM critères • PHANToM histoire • PHANToM problèmes/physique</li> </ul>   | 8- le PHANToM (l'histoire, les critères, les avantages, les problèmes et les applications)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• développement • études • futur</li> <li>• maintenant • recherche</li> </ul>   | 9- la recherche (l'avenir)   |

Pour finir, ces catégories ont été regroupées sous les trois grands thèmes importants de notre recherche, le design industriel, la perception et la technologie haptique :

Tableau III  
Le regroupement des catégories en thèmes

| Catégories   | Thèmes   |
|--|--|
| 1- les applications<br>(le design industriel, le modèle 3D et l'assemblage);<br>9- la recherche<br>(l'avenir).   | 1- le design industriel<br>le modèle 3D  |
| 2- la perception<br>(de la forme, haptique et visuelle et la reconnaissance de l'objet);<br>6- les interactions haptiques<br>(les aspects humains, physique et entre utilisateurs);  | 2- la perception<br>l'interaction haptique, la perception haptique et la perception visuelle et la reconnaissance de l'objet |
| 3- la technologie haptique<br>(la compréhension haptique, le rendu haptique, les limites haptiques, les problèmes haptiques et les algorithmes);<br>4- les collisions<br>(la pénétration et les objets déformables);<br>5- la texture<br>(la rugosité, la friction, le lisse et le 2D);<br>7- l'interface<br>(l'interface haptique et les critères);<br>8- le PHANToM<br>(l'histoire, les critères, les avantages, les problèmes et les applications); | 3- la technologie haptique<br>les interfaces haptiques, le rendu haptique et la texture                                      |

#### **4.1.8 Les conclusions**

Dans le chapitre V nous discuterons des résultats de notre méta-analyse. Nous ferons le point sur les trois thèmes qui ont guidé notre démarche et nous ferons des liens entre les différentes informations qui émergent de ce travail afin de répondre à nos objectifs et à notre hypothèse.

#### **4.1.9 La bibliographie**

Dans l'annexe B, nous retrouvons un tableau des différentes études consultées avec le nom et le prénom des chercheurs, l'université, le pays, le département, le titre de la recherche, l'année et le nombre de pages. Chacune des 24 recherches citées dans la méta-analyse se retrouve de façon plus détaillée dans la bibliographie.

#### **4.1.10 Les données de références**

Dans l'annexe C, nous retrouvons toutes les citations originales en anglais qui ont été utilisées dans la méta-analyse. Elles sont regroupées sous les trois grands thèmes : le design industriel, la perception et la technologie haptique.

### **4.2 Conclusion**

L'utilisation de la méta-analyse dans cette recherche permet de regrouper différentes informations afin d'analyser l'utilisation de l'interface haptique et de valider notre hypothèse. Grâce à cette source de connaissances, nous pouvons aller chercher de l'information pertinente sur notre sujet et recouper les affirmations, ce qui renforce la validité des idées présentées. Cette méta-analyse permet d'étendre la connaissance de notre sujet d'étude de façon objective.

## CHAPITRE V

### Discussion des résultats de la méta-analyse

La méta-analyse permet de faire le point sur l'état actuel du développement des systèmes haptiques et spécialement sur les travaux effectués avec le PHANTOM (interface haptique à un point de contact). Cette collecte d'informations vise une meilleure compréhension du potentiel réel de la technologie. Nous avons relevé des pistes de recherche qui sont déjà ouvertes pour une exploitation performante des sensations haptiques. Cet éventail de données avait pour objectif de confirmer notre hypothèse :

*L'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.*

#### 5.1 Le design industriel

L'utilisation de l'interface haptique dans le domaine du design industriel est une piste qui suscite de l'intérêt du fait que le concepteur puisse avoir une interaction physique avec son modèle numérique. Le terme « haptique » couvre tous les aspects de l'exploration et de la manipulation manuelles par les êtres humains et les machines (ou l'interaction entre les deux) exécutées dans le monde réel ou dans le monde virtuel. Le design industriel est une profession impliquée dans la définition de la forme du produit et répand l'usage du modèle tridimensionnel (3D). Aujourd'hui, le designer utilise la modélisation 3D numérique pour élaborer des concepts, ce qui apporte une sophistication sur le plan de la conception, mais qui demande une compréhension plus aiguë de ce qui est conçu virtuellement.

L'utilisation de la technologie informatique amène le designer à suivre l'évolution de cet outil et le développement de l'interface haptique est un pas de plus vers le monde

de la réalité virtuelle, en apportant une compréhension tactile du modèle numérique 3D (Basdogan et Srinivasan, 2002).

### 5.1.1 Le modèle 3D

Ces dernières années, certaines maquettes physiques ont été remplacées par des prototypes virtuels<sup>35</sup>. Les modèles de données numériques sont utilisés comme le cœur du processus de design, où les concepteurs peuvent travailler sur le même modèle et exécuter plusieurs analyses pour le valider. Cela amène des coûts réduits, une diminution du temps de travail et une meilleure compétitivité. De nos jours, les prototypes virtuels ont une grande variété d'usages, mais ils ne couvrent pas toutes les possibilités qu'offrent les modèles physiques. Un des problèmes observés dans leurs emplois a trait à l'interface entre l'utilisateur et le modèle. Le sens du toucher est un des outils humains les plus importants pour percevoir et analyser un objet, et c'est ce qui manque présentement dans les prototypes virtuels. Les interfaces haptiques essaient de combler cette lacune, tout en rendant plus réaliste l'interaction entre l'utilisateur et le monde virtuel (Gutierrez et coll., 1998). On peut croire que le réalisme des applications de prototypage virtuel peut être grandement amélioré par l'emploi d'un système à retour de force à six degrés de liberté comme le PHANTOM. Les avantages sont nombreux : diminution de la durée des cycles, réduction des coûts, augmentation de la flexibilité et facilitation du processus d'ingénierie, interactivité accrue (Chen, 1999).

Ce sont les différentes possibilités de la technologie haptique qui nous permettent de comprendre l'intérêt du designer d'accéder au monde des sensations physiques par le biais d'une interface haptique. Par exemple, l'avènement du modelage virtuel<sup>36</sup> représente un support très intéressant pour les étudiants qui ont besoin de développer leurs habiletés dans la manipulation de formes et la construction de modèles physiques. Pour répondre aux exigences du milieu universitaire, l'émergence de la

---

<sup>35</sup> Premier exemplaire d'un modèle créé par un ordinateur. Simulé (Dictionnaire francophone de l'informatique 2003).

technologie du modelage numérique<sup>37</sup> avec retour de force haptique permet de développer la manipulation de formes du point de vue virtuel. Même si ce support n'est pas au point pour le moment à cause de différents problèmes techniques (vitesse d'affichage), son existence est par le fait même une avenue envisageable pour le concepteur. Le travail direct de la forme fait surgir des informations sur la texture en laissant une liberté de création nécessaire dans le processus de conception. Les praticiens du design et les professeurs ont exploré la pratique du modelage haptique<sup>38</sup>, en considérant sa capacité à s'intégrer dans la pratique du design industriel et son aide à l'apprentissage. L'application de cette technologie s'est avérée peu appropriée à l'étape de la génération de concepts, en raison du manque de spontanéité lié à cette méthode de modelage. Les attentes face au modelage haptique étaient trop élevées, puisque l'on supposait que cette technique de modelage serait comme celle du travail conventionnel du styromousse ou de l'argile. Malheureusement, les fonctionnalités du logiciel et l'interface ont rendu difficile l'obtention de la qualité nécessaire à l'interprétation et à la production du modèle. Il pourrait être aussi avantageux d'utiliser le modelage haptique éventuellement pour faire des essais sur une matière virtuelle avant de travailler sur le vrai matériau. Il est permis de croire que l'interface haptique de bureau aura un impact majeur comme aide au design conjointement avec le prototypage virtuel (Chen, 1999).

Dans le design de tout produit, il est toujours important de s'assurer qu'il peut être assemblé et démonté rapidement et sans problème, principalement lors de la conception de pièces mécaniques. Dans la modélisation numérique 3D, on retrouve des renseignements au sujet des dimensions et des composantes; cependant, ceux-ci sont insuffisants pour déduire la séquence d'assemblage et de démontage (Chen, 1999).

---

<sup>36</sup> Action de modeler un objet artificiel créé par un ordinateur. \* Simulé (Dictionnaire francophone de l'informatique 2003).

<sup>37</sup> Action de modeler en système binaire (base 2) l'information destinée à un traitement informatisé (Dictionnaire francophone de l'informatique 2003).

<sup>38</sup> Action de modeler à l'aide d'interface haptique. (Dictionnaire francophone de l'informatique 2003).

Grâce à la réalité virtuelle, l'utilisateur peut entrer dans un « monde » virtuel au moyen d'accessoires spéciaux (lunettes, casques, gant, etc.) et simuler différents assemblages et différentes opérations d'entretien des composantes mécaniques.

Cet état de fait s'avère fort utile aux designers et au personnel d'entretien (Gutierrez et coll., 1998). Pour le design, le contact avec le modèle numérique amène le concepteur plus près de la réalité.

## **5.2 La perception**

La perception tactile amène l'humain à prendre connaissance physiquement du monde qui l'entoure. C'est le toucher qui joue un rôle clé lorsqu'il s'agit d'examiner des objets dans le monde réel, mais, jusqu'à tout récemment, il n'était pas possible d'utiliser ce sens avec réalisme dans les environnements virtuels (Brewster, 2001).

C'est à travers le système haptique humain que l'individu reçoit les renseignements sensoriels d'un objet. Le mouvement est la base de la mise en contact avec les aspects physiques d'un objet; en particulier, la main humaine qui est un organe polyvalent capable de presser, de prendre et d'écraser un objet. Elle peut explorer les propriétés de la surface de l'objet telles que la texture, la forme et la douceur. Elle peut se servir d'outils comme un stylo ou un marteau. Elle est capable de toucher, de ressentir et de manipuler des objets dans un environnement avec l'aide de la vision et de l'ouïe, qui donnent un sens d'immersion. L'interaction humaine est sérieusement handicapée et appauvrie si l'environnement virtuel ou réel ne permet pas de toucher ou de ressentir les objets (Srinivasan, Basdogan et Ho, 1999). Le mouvement de la main est un déterminant crucial pour la vitesse et la reconnaissance d'un objet. Pour cette raison, l'interface haptique est un obstacle, car elle ne laisse pas de place à la pleine liberté, à la reproduction du mouvement physique.

### 5.2.1 L'interaction haptique

Le concept de base de l'interaction haptique virtuelle avec un objet consiste en un contrôle d'un seul point par l'utilisateur de l'interface. La nouvelle position et l'orientation sont calculées pour contrôler le mouvement dynamique du corps rigide (Basdogan et Srinivasan, 2002).

La technique de l'interaction haptique basée sur les points permet à l'utilisateur de toucher et de sentir les objets polyédriques 3D et leurs détails de surface. Cette technique contient des algorithmes de surveillance de voisinage (*neighborhood watch*) avec lesquels il est possible de manier les objets convexes et concaves. Le temps d'affichage moyen est presque constant pour les objets complexes, indépendamment du nombre de polygones représentant l'objet. Cette technique permet d'appliquer des textures sur des surfaces 3D; la friction et la texture peuvent être combinées pour produire des simulations réalistes et pour simuler de façon dynamique des objets rigides ou déformables (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999).

Une des inquiétudes majeures concernant l'interaction haptique est liée au temps de calcul informatique, qui augmente habituellement avec le nombre de polygones. Dans un tel cas, la qualité de l'interaction haptique dépendra de la complexité de l'environnement et, si les forces reflétées ne peuvent pas être mises à jour assez rapidement, des instabilités de contact se produiront (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999). Cette technologie utilise le toucher qui permet un échange bidirectionnel d'informations avec l'environnement virtuel. Cet apport d'informations ne peut être senti que par la pression cutanée qui est amenée mécaniquement par l'interface haptique.

*Two way communication between the user and the computer enabled by force feedback would be absolutely necessary in order to simulate the "feel" of the organs or the clay as they are manipulated. In contrast to vision and hearing, haptics is the only modality that permits this bi-directional information transfer between the user and virtual environment.*

*Current excitement in developing haptic interfaces arises from applications like these, and others like those listed below*<sup>39</sup> (Srinivasan et Basdogan, 1997; cité dans Biggs et Srinivasan, 2002, p. 94).

L'interaction haptique entre plusieurs utilisateurs est potentiellement très prometteuse. Le développement d'un protocole de réseau pour un groupe d'utilisateurs constitue un problème et un grand défi, car les changements dans la scène virtuelle exigent la mise à jour fréquente de la base de données haptiques. À cause du délai dans le temps qu'occasionne un réseau, de la difficulté de quelques-unes des tâches combinées, de notre manque de connaissances sur les capacités de l'utilisateur et sur son comportement, le développement d'un modèle universel haptique reste une chose très complexe (Basdogan et Srinivasan, 2002). Il est possible que l'addition de modalités haptiques à un environnement virtuel partagé, accompagné du visuel et de l'auditif, augmente le sentiment d'être ensemble et la qualité des interactions pendant que les utilisateurs exécutent une tâche commune (Ho et coll., 1998).

### **5.2.2 La perception haptique et la perception visuelle**

Bien que l'utilisation des appareils haptiques paraisse adéquate pour beaucoup de tâches, elle demande habituellement une attention visuelle comme dans le monde réel. Une interface haptique est une solution simple qui peut réduire le visuel, mais elle exige de l'utilisateur une attention sur le retour de force et une amélioration de l'exactitude des entrées spatiales (Basdogan et Srinivasan, 2002). Il existe des biais dans la perception haptique et visuelle et la combinaison des deux modalités amène différentes observations. Des résultats d'expériences sur la dimension montrent qu'avec la vision, les objets plus lointains sont perçus comme plus petits en raison de la perspective; avec l'addition de la sensation haptique, cette illusion est réduite.

---

<sup>39</sup> Notre traduction : « La communication bidirectionnelle entre l'utilisateur et l'ordinateur, rendu possible grâce au retour de force, est une condition absolument nécessaire à la simulation du toucher lors de la manipulation d'organes virtuels en médecine ou d'argile en sculpture virtuelle. À l'encontre de l'ouïe et de la vision seulement, l'haptique permet un échange bi-directionnelle de l'information entre l'utilisateur et l'environnement virtuel. L'enthousiasme, émanant du développement des interfaces haptiques, survient dans les applications comme celles-ci et d'autres comme ceux de la liste qui suit. »

Les résultats des expériences sur la dureté (*stiffness*) révèlent que les objets qui sont plus lointains sont perçus comme plus mous quand nous utilisons la réaction haptique; l'addition de la vision diminue ce biais. Certaines preuves basées sur des expériences effectuées à travers le monde ont indiqué que les renseignements visuels peuvent changer la perception haptique des propriétés spatiales comme la dimension, la direction, la localisation et la forme (Wu, Basdogan et Srinivasan, 1999).

Les perceptions tactiles et visuelles sont souvent associées lors de la perception d'un objet. Les renseignements concernant les propriétés de l'objet ont besoin d'être montrés différemment pour être saillants sous les conditions d'exploration haptique et d'exploration haptique-visuelle. Quand les renseignements visuels sont rapidement disponibles, la forme globale et les informations structurelles deviennent les propriétés qui définissent un objet. Donc, les renseignements sur la forme sont extraits facilement par les moyens visuels, alors que l'assemblage haptique de ces mêmes renseignements requiert une procédure d'exploration qui suit le contour de l'objet, ce qui demande une grande mémoire pour intégrer temporellement les signaux variables (Wall et Harwin, 2000). D'où la conclusion que les systèmes visuel et haptique se compensent l'un l'autre et que les renseignements sensoriels qui viennent de ces deux canaux sont confondus de façon optimale (Wu, Basdogan et Srinivasan, 1999).

### **5.2.3 La reconnaissance de l'objet**

La reconnaissance de l'objet exige la perception de ses attributs. Ainsi, la compréhension des facteurs qui déterminent la vitesse de reconnaissance haptique d'un objet dans le monde physique nous donne une base pour prédire l'usage de l'interaction technique pour la reconnaissance des objets et la perception des attributs dans un environnement virtuel. Les facteurs clés qui déterminent cette vitesse ont été largement étudiés. Il s'agit du nombre différent d'attributs perçus simultanément, du nombre de doigts utilisés et les gestes effectués pour percevoir ces attributs.

Les participants qui utilisent un seul doigt prennent beaucoup plus de temps à reconnaître de façon haptique un objet parce qu'ils ont à construire le modèle de la forme (intégration temporelle). Par contre, lorsqu'ils utilisent les deux mains ils peuvent percevoir directement la forme globale de l'objet dans un seul geste (intégration spatiale). L'accès à un moins grand nombre d'attributs de l'objet réduit la vitesse de reconnaissance, cela démontre l'importance des propriétés matérielles, dont les perceptions thermiques et les textures, dans la reconnaissance de l'objet.

Ces propriétés matérielles sont très importantes quand les participants ne peuvent toucher l'objet qu'avec un seul doigt. Les mouvements de la main exécutés par les utilisateurs lors d'expériences sur la reconnaissance de l'objet sont des déterminants cruciaux de la vitesse et de l'exactitude de la reconnaissance (Aviles et Ranta, 1999).

### 5.3 La technologie haptique

La technologie haptique permet aux utilisateurs de sentir des objets virtuels en simulant physiquement, à l'aide d'interface, le monde virtuel. C'est en calculant les forces en temps réel et en retournant mécaniquement celles-ci à la personne qui utilise l'appareil haptique que l'on obtient la simulation d'un objet solide, comme s'il était vraiment en face de l'utilisateur. Ces interfaces fournissent la position, de même qu'elle stimule le sens du toucher, en procurant des sensations à l'utilisateur sous forme de force. Les appareils tactiles agissent sur la surface de la peau en la poussant ou en la tirant. Par exemple, les appareils à retour de force agissent sur le doigt, la main, la position du corps ou le mouvement (Brewster, 2001). C'est ainsi que, pour exécuter des tâches avec une interface haptique, l'utilisateur humain transporte ses actions motrices de manipulation à travers son interface physique, qui affiche les renseignements sensoriels, en stimulant convenablement son système sensoriel tactile et kinesthésique<sup>40</sup>. En général, l'haptique peut être envisagé comme ayant deux fonctions : mesurer les positions et les forces de contact et afficher les forces de contact et les positions pour l'utilisateur (Basdogan et Srinivasan, 2002).

---

<sup>40</sup> Relatif à la sensation interne de la position et des mouvements du corps.

### 5.3.1 Les interfaces haptiques

Le développement de la technologie haptique passe par le rendu réaliste des perceptions tactiles humaines. Les interfaces haptiques utilisées pour distribuer les forces sur la peau font l'objet d'une problématique particulière qui amène l'exploration de nouvelles technologies pour les améliorer.

La flexibilité mécanique est un défi majeur dans le développement d'une interface tactile portable, ainsi que la peau humaine, cet environnement dynamique sujet aux bosses, aux grattements et à la difformité due à la flexion des segments du corps. Les interfaces tentent de se rapprocher idéalement de l'exosquelette idéal ou d'un manche d'outil.

Ces appareils doivent tenir compte des forces terrestres qui agissent sur le corps. Telle une main, l'exosquelette est capable de simuler des forces (par exemple, la résistance d'une balle de tennis pressée avec le pouce et l'index), mais il ne peut pas simuler toutes les forces (par exemple, le moment de la rotation de l'épaule de l'utilisateur due au poids de la balle). La performance de l'utilisateur avec ces deux types de forces a été comparée pour quelques tâches et a été trouvée approximativement équivalente.

Le développement des interfaces haptiques commence à peine, comparativement à la technologie courante sonore et vidéo des environnements virtuels. Un large éventail d'appareils est en développement dans des compagnies et des universités à travers le monde (Basdogan et Srinivasan, 2002). Même les meilleurs appareils haptiques sont limités, principalement par le contact physique à travers un seul point, comme un doigt seul ou un détecteur. Il n'existe pas encore d'appareil pour la main entière qui comporte une grande fidélité de retour de force, ce qui limite la gamme d'applications. La réaction cutanée représente un problème supplémentaire, car elle est très limitée dans la plupart des appareils haptiques. Les subtiles textures de surface sont perçues normalement comme de minuscules déformations cutanées sur la surface

de la peau, ce qui est très difficile à reproduire mécaniquement; d'ailleurs, la plupart des appareils haptiques ne peuvent le faire (Chen, 1999).

L'appareil haptique principalement utilisé dans les recherches est le PHANTOM de Technologies SensAble. Ses six degrés de liberté (les degrés de liberté font référence au nombre de dimensions de mouvement) amènent une très haute résolution. Ils fournissent un sens du toucher programmable, qui permet aux utilisateurs de sentir les textures et les formes d'objets virtuels, de moduler et de déformer des objets avec un très haut degré de réalisme (Brewster, 2001). Le PHANTOM permet à l'utilisateur de déplacer sa main librement sur un bureau (Chen, 1999). Le stylet est utilisé pour toucher l'objet 3D; en promenant le stylet le long de la surface externe, il peut détecter les bords et les coins. La position du doigt de l'utilisateur (la position du stylet) est visualisée à l'écran (Huang, Huamin et Kaufman, 1998). Pour l'instant, les utilisateurs sont toutefois restreints par les interfaces disponibles. Une interface idéale devrait fournir une manière facile de contrôler la position et l'orientation d'un objet virtuel dans un espace 3D. Elle devrait aussi apporter à l'utilisateur les renseignements relatifs au contact avec l'objet (Chen, 1999). Il est important de trouver un bon équilibre entre la complexité et la performance dans la capacité du système d'exécuter généralement la tâche. En particulier, la fidélité de l'image tactile devant être affichée dépend de la tâche, de la stimulation des autres modalités sensorielles et de l'interaction entre ces modalités. Les interfaces haptiques disponibles expérimentées conjointement avec le visuel et l'auditif permettent de relever les améliorations nécessaires pour perfectionner le design. Les compromis quant à la conception et aux ruses pour accomplir les performances exigées par la tâche sont une source d'investigations. L'usage des illusions à travers d'autres modalités (telles que la dominance visuelle) permet à l'utilisateur de ressentir des sensations au-delà des limitations de l'appareil (Biggs et Srinivasan, 2002). Il faut s'attendre à ce que les appareils haptiques atteignent les bureaux d'utilisateurs d'ordinateur dans les prochaines années. Cependant, il y a encore du travail à faire en ce qui concerne la recherche de prototypes pour que ceux-ci soient plus ergonomiques et plus faciles d'utilisation (Giess, Topfer et Meinzer, 1999).

### 5.3.2 Le rendu haptique

Le rendu haptique intervient dans la perception tactile en général pour contrôler les interfaces haptiques; l'interaction exige une combinaison du rendu volumique en temps réel et d'un contrôle en boucle (Huang, Huamin et Kaufman, 1998).

La détection de collisions dans le rendu haptique a pour but de vérifier les collisions, non seulement entre les objets mais aussi entre les détecteurs et l'objet virtuel afin de calculer les forces de l'interaction. Quand on simule l'interaction entre les détecteurs et les objets, la force reflétée augmente avec la distance de pénétration, telle que la résistance de pénétration plus profonde dans un objet (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999). La détection de collisions et le calcul des distances sont importants pour plusieurs applications dans le domaine de l'ingénierie, comme la simulation dynamique, la vérification des tolérances et la manipulation d'objets (Lin et coll., 1999).

Le rendu avec interaction haptique, basé sur les objets volumétriques, serait particulièrement utile quand l'utilisateur tente de localiser précisément une caractéristique dans un volume : entrer dans un objet volumétrique, comprendre l'arrangement spatial des structures tridimensionnelles complexes ou travailler de manière tactile sur un objet (Snibbe, Anderson et Verplank, 1998).

Parmi toutes les représentations possibles des formes d'objets, la distribution de la courbure de la surface paraît être la plus pertinente au point de vue tactile. La discrimination humaine sur la conformité d'un objet dépend de sa surface, qui peut être déformable ou rigide. Quand la surface est déformable, la distribution de la pression spatiale dans la région du contact dépend de la discrimination des différences subtiles de la surface. Lorsque la surface est rigide, il faut posséder des renseignements kinesthésiques pour la discrimination, celle-ci étant beaucoup plus pauvre que pour les surfaces déformables (Biggs et Srinivasan, 2002). Avec l'addition de la perception haptique, les objets déformables ont gagné de nouvelles caractéristiques.

Les modèles déformables doivent pouvoir estimer non seulement la direction et l'importance de la déformation de chaque sommet mais aussi la magnitude et la direction des forces de l'interaction qui sera reflétée à l'utilisateur par l'interface haptique. La déformation basée sur la géométrie est plus facile et plus rapide à rendre effective, car elle ne demande pas de simuler la mécanique sous-jacente à la déformation.

La déformation basée sur une approche physique, bien que nécessaire pour simuler le comportement d'objets déformables, demande beaucoup de puissance, sans pour autant rendre les résultats en temps réel de manière toujours convenable. En général, l'approche hybride comporte les avantages des deux mondes et permet de bien travailler avec les applications en temps réel (Basdogan et Srinivasan, 2002). La simulation en temps réel d'objets non rigides exige un pouvoir de calcul qui n'est pas encore à point. Dans quelques cas spéciaux, il est cependant possible, avec plusieurs suppositions et approximations, d'obtenir des résultats plus réalistes que ceux que permet d'obtenir le modelage d'objets (Deangelis et coll., 1997).

L'application du rendu haptique se retrouve dans le concept où l'on préenregistre le stimulus haptique et qu'on le fait ressentir de façon passive à un utilisateur. On peut trouver plusieurs applications intéressantes. Par exemple, l'utilisateur équipé d'un appareil haptique de bureau pourrait toucher et sentir les textures d'un siège de voiture, cela ayant été fait par une publicité d'un concessionnaire automobile par l'entremise d'Internet (ce concept est semblable au téléchargement du dossier d'un film et à sa projection sur l'écran). Le fait d'enregistrer le stimulus haptique et de le repasser a aussi été exploité pour la formation; on a alors amené l'utilisateur dans la trajectoire préétablie par un expert. Le novice peut, à ce moment, suivre cette trajectoire et sentir les forces préenregistrées de façon continue (Basdogan et Srinivasan, 2002).

### 5.3.3 La texture

Les techniques pour simuler les textures permettent d'ajouter de la rugosité à une surface lisse. Ayant un rôle semblable à celui des textures dans le graphisme 2D, les textures haptiques ajoutent de la complexité et du réalisme à la géométrie existante. Les techniques pour simuler les textures réduisent la charge sur la géométrie pour exprimer explicitement la texture. Dans le graphisme informatique, le résultat de la simulation des textures dépend des calculs de la couleur de chaque pixel dans les images.

De la même façon, les textures haptiques sont déterminées par la direction et la magnitude de la force qui sera reflétée à l'utilisateur. Pour simuler les textures haptiques, on a besoin de connaître l'IP (*ideal haptic interface point*), le HIP (*haptic interface point*), et la hauteur des champs qui sera inscrite sur la surface (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999).

Il existe, dans la texture, une prédominance de deux dimensions : la dimension du rugueux/lisse et la dimension du dur/mou. On observe aussi une troisième dimension : collant/glissant (Hollins et coll., 1998). La plupart des travaux contemporains sur la rugosité ont conduit les chercheurs vers la perception de la texture. Celle-ci est composée de trois éléments : l'amplitude (la profondeur de la rainure), la largeur de la rainure (la largeur de la rainure elle-même) et la largeur de la bande (l'espace entre les rainures). L'estimation de la magnitude des stimulus de la rugosité indique que la largeur de la rainure constitue le déterminant le plus significatif de l'intensité de la rugosité. Dans les études portant sur la réalité virtuelle, la rugosité perçue a augmenté en fonction de la largeur de la rainure décroissante. L'appareil utilisé peut exercer un effet considérable sur le taux perçu de rugosité. La théorie psychologique affirme que l'intensité perçue d'une caractéristique psychologique, par exemple la rugosité, est reliée à l'intensité réelle de la caractéristique physique des stimulus (Penn et coll., 1998).

C'est habituellement par la friction qu'une personne entre en contact avec les surfaces lisses lors de l'exploration d'objets dans le monde réel. Par conséquent, en plus de la forme de l'objet, la propriété de la surface est un facteur important qui augmente l'aspect naturel de l'environnement virtuel. Dans les simulations, les propriétés de la surface sont séparées en deux catégories : la texture et la friction. D'un point de vue informatique, la texture est représentée comme une forme. Cependant, la friction et la texture peuvent être simulées par des perturbations appropriées afin de refléter ces forces.

La différence majeure entre la simulation de la friction et la simulation de la texture par un appareil haptique est que le modèle de la friction crée seulement des forces latérales, tandis que le modèle de la texture modifie les deux, les forces latérales et normales. Différentes techniques ont été proposées pour l'affichage des propriétés de la surface telles que la forme, la friction et la texture d'objets virtuels :

- les méthodes de projection d'ombre pour lisser les objets polyédriques et pour éliminer la discontinuité de la force aux limites polygonales;
  - les techniques pour simuler le frottement des surfaces lisses;
  - les algorithmes pour simuler des textures sur des surfaces 2D;
  - les méthodes pour produire des textures stochastiques sur des surfaces précises
- les techniques pour rendre la texture haptique d'objets polyédriques (Ho, Basdogan et Srinivasan, 1999).

#### **5.4 Conclusion**

La présente recherche avait comme premier objectif de *comprendre quelles informations sont apportées par la technologie haptique et comment celles-ci peuvent influencer un processus de design industriel.*

Nous avons vu que la technologie haptique offre des perspectives d'avenir pour la création des plus intéressantes en permettant d'interagir physiquement dans le monde virtuel.

Selon les différentes recherches consultées, il est permis de croire que les sensations que procure la perception tactile amènent la compréhension des différentes caractéristiques d'un objet virtuel. L'interface haptique représente ces sensations tactiles en utilisant la force mécanique.

La texture fait partie de l'essence d'un produit, de son identification; la possibilité de recréer la matière et sa surface virtuellement ajoute à cette reconnaissance. La texture haptique est une combinaison de variations peu importantes de la surface géométrique et des caractéristiques adhésives et de friction. La technologie haptique donne cette possibilité d'ajouter des caractéristiques physiques à un modèle en cours de conception. La subtilité des détails haptiques ne peut qu'améliorer le réalisme. L'interface haptique permet d'intervenir aussi sur la matière avec le modelage virtuel. Cette technologie permet de sculpter directement à l'écran, toutefois l'obtention de la qualité nécessaire à l'interprétation et la production d'un modèle n'est pas encore au point.

La technologie haptique donne à l'utilisateur la possibilité de travailler dans un environnement virtuel grâce à l'interface qui transcrit les gestes du monde réel.

C'est ainsi que les prototypes numériques 3D<sup>41</sup> peuvent être manipulés physiquement avec un nouvel apport d'informations sur les sensations qu'ils génèrent et leurs ergonomies. Les manipulations de pièces pour l'assemblage et le désassemblage peuvent être testées à l'écran de manière virtuelle. L'interface haptique donne aussi la possibilité de faire du travail en simultané dans un environnement collaboratif.

Cependant, l'interaction haptique occasionne des problèmes compte tenu que le calcul informatique augmente avec la complexité du modèle auquel on a ajouté une texture 3D (nombre de polygones), ce qui rend plus difficile la simulation dynamique des objets 3D en temps réel. Le problème du temps réel, pour la reconnaissance de la forme et la déformation d'objets, constitue un problème actuel et une barrière à la

---

<sup>41</sup> Premier exemplaire d'un modèle en trois dimensions construit en système binaire (base 2) destiné à un traitement informatisé. (Dictionnaire francophone de l'informatique 2003).

compréhension, car il est difficile d'afficher la complexité. Pour rendre l'information réaliste, il est nécessaire d'avoir accès à cette vitesse d'affichage. Même si cette technologie permet aujourd'hui différentes actions dans le monde virtuel, comme nous l'avons vu dans différentes études, elle n'est pas tout à fait au point. Toutes ces possibilités, qu'offre la technologie haptique, sont en devenir.

Les avancées futures de cette technologie amèneront probablement une plus grande malléabilité dans son utilisation, mais actuellement, plusieurs facteurs techniques empêchent son emploi de façon plutôt instinctive. La possibilité d'avoir accès aux caractéristiques physiques d'un modèle virtuel amènera des alternatives lors de la conception, dès le début du processus.

Pour ce qui est de notre deuxième objectif, qui était de comprendre la différence entre le toucher physique et celui que procure une interface haptique, nous avons noté que l'utilisateur d'interface haptique recherche dans la manipulation de l'appareil le côté naturel de la perception tactile. Ce qui est représenté par la liberté de mouvement, la dextérité, la force et la précision et qui ne sont pas encore tout à fait au rendez-vous. Il est important de savoir que la perception dans le monde réel est multimodale et que cet apport des différents sens donne à la perception une richesse d'information. C'est ainsi que la vision joue un rôle dans la perception haptique réelle ou virtuelle. La juxtaposition de la vue et du toucher renseigne sur la texture, la forme et la qualité conductrice d'un objet. Cependant, nos sens nous jouent des tours en ce qui concerne la perception. Les illusions, les distorsions sont des phénomènes avec lesquels l'utilisateur de la technologie haptique doit composer pour avoir une idée juste de ce qu'il touche. L'interface haptique est un défi afin de reproduire l'appareil haptique humain, qui demande de nombreux points de contact avec ses récepteurs et la pleine latitude dans la reproduction du mouvement physique.

Selon notre hypothèse, l'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension de son modèle influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.

On retrouve dans la modalité haptique humaine un échange bidirectionnelle d'informations, par rapport au visuel qui est unidirectionnel; ce qui permet un interaction au niveau des sensations tactiles.

Ces informations renseignent l'utilisateur d'interface haptique sur le modèle qu'il examine en lui permettant d'avoir accès par le toucher aux différentes caractéristiques de celui-ci. Pour le designer, le fait de mieux comprendre ce qu'il conçoit en ayant un aperçu global lui permet de prendre des décisions judicieuses tout au long du processus de conception.

Cependant, notre démarche nous amène à conclure que la technologie haptique, au stade actuel de développement, ne présente pas pour le designer industriel un outil très souple en ce qui a trait au processus de conception. Il est aisé d'imaginer qu'avec la somme d'énergies de recherche qui se déploient dans le domaine à travers le monde, le jour viendra où la sensation haptique sera partie intégrante de toute interface standard. Toute cette compréhension, du toucher haptique, et des outils qui s'y rattachent, permet de présumer que ce n'est que les balbutiements de la grande aventure du toucher dans le monde virtuel.

## CHAPITRE VI

### Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons essayé de cerner l'utilisation potentielle de l'interface haptique en design industriel et son influence sur le processus de conception. Cette étude nous a permis de comprendre l'interactivité tactile dans l'accession de nouvelles informations relatives à un modèle numérique 3D et ainsi d'anticiper l'influence de cet outil sur la démarche de conception. Nous avons étudié le processus de conception et l'impact de l'outil informatique en design industriel à travers le modèle 3D et la CAO. Nous avons vu que le modèle est au centre de la conception d'un objet en design industriel. Nous avons cherché à faire le point sur la perception tactile, en passant en revue les grands courants de pensée d'où émergent les théories sur le processus de perception. Nous avons examiné les caractéristiques physiologiques de l'humain qui lui permettent d'être en contact avec les choses qui l'entourent. Nous avons étudié l'interactivité qui amène la communication entre le designer et l'environnement virtuel. Nous avons brossé un portrait sommaire des interfaces disponibles en essayant de comprendre les systèmes avec lesquels les sensations sont retournées à l'utilisateur, les recherches et les applications étant nos sources d'informations.

C'est en ayant recours à une méta-analyse que nous sommes allée chercher la connaissance sur l'utilisation de l'interface haptique. Il est important de préciser que l'information sur l'interface haptique vient de différents domaines dans le monde scientifique et que nos conclusions sont extrapolées pour le design industriel à travers, notamment, l'interactivité tactile et la compréhension du modèle numérique. Notre étude est basée principalement sur les recherches effectuées avec le PHANToM et reflète la réalité actuelle de ce qui s'accomplit avec ce type d'interface haptique. Avec l'évolution de la technologie, nous pouvons penser que l'information n'est valable qu'à court et à moyen termes.

Notre démarche nous a permis de répondre à notre question :

***Comment l'interactivité provoquée par l'utilisation d'une interface haptique, lors de la création d'un modèle informatique, peut-elle avoir une incidence sur la démarche de conception?***

Nous partons du fait que le système haptique humain est bi-directionnel, donc, en manipulant un objet, le sujet interagit sur la matière et vice versa.

Cet échange d'informations renseigne sur l'objet et sur sa nature (texture, matériau, forme, structure). Nous retrouvons cette interactivité en passant par l'interface haptique qui permet un contact physique avec le modèle virtuel, ce qui informe le concepteur sur les caractéristiques de celui-ci. Cette technologie permet le modelage virtuel, ce qui donne la possibilité à l'utilisateur de travailler directement la matière à l'écran. Elle lui fournit aussi le choix d'ajouter des caractéristiques physiques à un modèle virtuel. La technologie haptique donne des alternatives au niveau de la conception dès le début du processus. Ce qui est en soit un changement dans le processus de conception.

Nos objectifs ont été atteints, dont le premier, ***comprendre quelles informations sont apportées par la technologie haptique et comment celles-ci peuvent influencer un processus de design industriel.***

Nous avons observé à travers les nombreuses recherches consultées que les caractéristiques physiques déterminent l'objet et que l'accessibilité à l'information haptique venant d'un modèle virtuel sur le plan de la texture et des sensations créées par elle peut contribuer à comprendre le modèle numérique 3D. C'est en procurant de nouvelles possibilités, comme l'analyse des caractéristiques d'un modèle 3D, en lui rendant un côté réaliste ou en permettant d'intervenir physiquement sur de la matière virtuelle (modelage virtuel), ou encore en ajoutant des caractéristiques au modèle en cours de conception, que le processus de design pourra être influencé.

Notre deuxième objectif nous a amenée à ***comprendre la différence entre le toucher physique et celui que procure une interface haptique.***

On peut déduire de notre méta-analyse que l'interface haptique essaie de reproduire les sensations physiques par des forces mécaniques, la liberté de mouvement, la dextérité, la force et la précision dans le mouvement de façon naturelle. Cependant, la problématique du système haptique humain, qui demande des stimuli en plusieurs points de contacts en même temps, est un défi et la reproduction de la souplesse du geste n'est pas encore atteinte. La complexité à reproduire ces stimuli en temps réels est aussi en développement à cause du calcul informatique. Le toucher haptique peut apporter des avantages durant le processus de conception d'un modèle virtuel par rapport à l'obligation du concepteur d'attendre la concrétisation physique de son modèle pour valider de façon tactile son idée. Par exemple, la rapidité à déceler des lacunes de façon ergonomique, la compréhension des textures et des matériaux, de la manipulation et de la sécurité et la simulation des fonctions.

Pour ce qui est de répondre aux autres questions comme : ***est-ce que cet outil permet une augmentation de l'efficacité sur le plan de la conception?***

Grâce à la méta-analyse, nous sommes arrivées à la conclusion que l'utilisation de l'interface haptique peut permettre d'intervenir plus tôt dans le processus de design, de façon à favoriser l'augmentation de l'efficacité, puisque l'on saisit mieux ce que l'on est en train de concevoir et que l'on peut mieux cibler les interventions. Le développement des interfaces haptiques, qui favorisent la manipulation de la matière directement à l'écran et de façon instinctive, devrait amener un bouleversement dans la façon d'agir sur le modèle numérique 3D et aura probablement une influence sur la façon de faire dans le processus de conception en design industriel.

Enfin, pour ce qui est de ***comment les interfaces haptiques actuelles devraient-elles évoluer idéalement?***

Aujourd'hui, de nombreux problèmes, comme l'encombrement et le poids du dispositif, le retour de force maximale, la stabilité<sup>42</sup> et la transparence<sup>43</sup> du dispositif, le calcul des forces par le logiciel et la communication temps-réel, freinent l'utilisation des interfaces haptiques. Le développement de la technologie haptique se trouve, en ce moment, dans les mains de développeurs privés et de chercheurs universitaires. La difficulté de la tâche est grande, car le système haptique humain est complexe. Il existe différentes interfaces haptiques qui tentent de se rapprocher des performances de la main, mais leur développement commence à peine. Ces interfaces tendent vers une interaction plus naturelle avec l'utilisateur. L'interface haptique laisse entrevoir des possibilités sensorielles et tactiles virtuelles incroyables, mais elle se bute, pour l'instant, sur la difficulté à reproduire mécaniquement la subtilité des sensations tactiles que l'on trouve dans la vraie vie. Dans le monde de la conception en design industriel, l'outil informatique a un côté rigide avec son clavier et sa souris pour produire des formes. En développant des interfaces qui permettent une interaction plus naturelle, le créateur pourra peut-être travailler de façon plus instinctive. Tout au long de ce mémoire, les avantages et les lacunes actuelles des interfaces haptiques ont été mis au jour et c'est à partir de ce point que la capacité de rendre plus naturel le toucher haptique devrait évoluer.

Pour ce qui est de notre hypothèse, *l'interactivité créée par l'interface haptique permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique. Ainsi, cette nouvelle compréhension de son modèle influence le processus de conception dans le domaine du design industriel.* C'est à travers la méta-analyse d'études sur l'utilisation de l'interface haptique PHANTOM dans différents domaines que nous en sommes venue à penser que notre hypothèse se confirme.

---

<sup>42</sup> Elle modifie les forces calculées par l'environnement de la simulation afin de les rendre compatibles avec les forces maximales délivrables par le dispositif et avec la fréquence de simulation dans toutes les conditions d'utilisation possibles. (Casiez et Meseure, 2003)

<sup>43</sup> Elle recense toute les perturbations que peut amener un dispositif à retour haptique et se charge alors de modifier les forces calculées afin de compenser ces perturbations. (Casiez et Meseure, 2003)

L'utilisation de l'interface haptique donne la possibilité d'intervenir au début du processus de conception, à l'étape de la création, soit à partir de la matière avec le modelage virtuel ou en ajoutant des caractéristiques physiques à un modèle en cours de conception. Nous estimons que la sensation tactile crée une interactivité avec le modèle virtuel, ce qui permet au designer d'accéder à de nouvelles informations sur son modèle numérique par le biais de l'interface haptique. Ainsi, cette nouvelle compréhension de son modèle devrait influencer le processus de conception. La technologie haptique est en devenir et, pour l'instant, elle n'est pas au point pour un usage commercial. Étant aussi très dispendieuse, elle se retrouve plutôt en milieu expérimental. On ne retrouve pas beaucoup d'études faites dans le domaine du design industriel et toutes les réponses à nos interrogations et nos conclusions sont le résultat de lien entre l'information trouvée et leurs applications dans le domaine du design industriel.

C'est pourquoi tout est encore à découvrir sur l'utilisation des interfaces haptiques dans le processus de conception en design industriel. L'expérimentation permettra aux créateurs de s'approprier l'outil, en formulant des demandes spécifiques quant à l'évolution des interfaces haptiques afin qu'elles puissent s'intégrer dans leur processus de création.

Différentes expérimentations devront être faites à travers le processus de conception pour valider la pertinence de la perception tactile et son rôle dans la compréhension virtuelle des sensations tactiles. Des études pour comprendre le contour (lecture des limites extérieures, frontières), la structure (lecture de la disposition/arrangement des parties), le rythme (lecture d'éléments à intervalles réguliers doués d'une fonction esthétique, harmonique et/ou fonctionnelle), le volume (lecture de la forme de façon tridimensionnelle), le poids (lecture de la répartition des masses) et la texture (lecture des sensations perçues par le toucher) permettrait au designer une utilisation judicieuse de l'interface haptique.

Cette possibilité de toucher l'environnement virtuel donne accès à un monde de sensations qui tente de reproduire la réalité. Cette technologie ouvre les portes à la créativité, en faisant vivre physiquement l'irréel.

## BIBLIOGRAPHIE

### *Monographies et revues*

- ANANIEV, B. G., L. M. WEKKER, B. F. LUMOV et A. V. YARMOLENKO.** 1959, *Le tact dans le processus de connaissance et de travail*. Moscou, Publ. House of the Academy of Pedagogical Sciences RSFSR.
- AVILES, W. et J. RANTA.** 1999, « A brief presentation on the VRDTS-Virtual Reality Dental Training System », dans J. K. Salisbury et M. A. Srinivasan (Éds), *Proceedings of the Fourth PHANToM User's Group Workshop*, AI Lab Technical Report n° 1675 et RLE Technical Report n° 633, Cambridge, MA, MIT, p. 73-77.
- BAKER R.** 1993, *Designing the Future*, New York, Robin Baker, 208 p.
- BALANIUK, R. et I. F. COSTA.** 2000, « An approach for physically based soft tissue simulation suitable for haptic interaction ». *Preprints of the Fifth Annual PHANToM Users Group Workshop*. Aspen, CO, Given Institute, p. 26-30.
- BASDOGAN, C. et M. A. SRINIVASAN.** 2002, *Haptic Rendering in Virtual Environments: Handbook of Virtual Environments*, K. Stanney. London, Lawrence Earlbaum, Inc.: Chapter 6. p. 117-134.
- BAUHAIN-ROUX, D.** 1992, *Gestion du design et management d'entreprise*, Paris, Chotard, 124 p.
- BERGER, C. et Y. HATWELL.** 1993, «Dimensional and overall similarity classifications in haptics: A developmental study», *Cognitive Development*, 8 (4), p. 495-516.
- BERKELEY, G.** 1935, *An Essay Towards a New Theory of Vision* (4<sup>th</sup> ed.) First edition published 1709, Classics Editor's, 250 p.
- BIGGS, J. S. et M. A. SRINIVASAN.** 2002, *Haptic Interface: Handbook of Virtual Environments*, K. Stanney. London, Lawrence Earlbaum, Inc.: Chapter 5. p. 93-115.
- BARHIN, G. B.** 1979, « L'heuristique et la création architecturale », *Conception assistée en URSS, théorie et pratique*, p. 59-70.
- BREWSTER, St.** 2001, « The Impact "Touching" Technology on Cultural Applications », dans *Proceedings of EVA 2001*. (Glasgow, UK), Vasari UK, p. 1-14.

- BREWSTER, St. et R. MURRAY-SMITH.** 2000, « Haptic Human-Computer Interaction ». *First International Workshop Glasgow, UK. August/September 2000 Proceeding*, New York, Springer, 217 p.
- BROWN D. C. et B. CHANDRASEKARAN.** 1988, « Expert Systems for a Class of Mechanical Design Activity », *Expert Systems in Engineering*, Ed.Pham D.T., IFS Publication/ Springer-Verlag Pub. p. 334-353.
- CAMPBELL, C.S., S. ZHAI, K. W. MAY et P.P. MAGLIO.** 1999, «What You Feel Must Be What You See: Adding Tactile Feedback to the Trackpoint», dans *Proceedings of INTERACT '99, IOS Press*, p 383-390.
- CASIEZ, G., et MESEURE, P.** 2003, *Interface Homme –Machine, Le retour haptique*, Lille, France, Université des Sciences et Technologie de Lille I, Cours retour haptique,19 p.
- CHEN, E.** 1999, « Six Degree-of-Freedom Haptic System for Desktop Virtual Prototyping Applications », dans *Proceedings of the First International Workshop on Virtual Reality and Prototyping*, p. 97-106.
- CHEN, J. et M. A. SRINIVASAN.** 1998, « Human Haptic Interaction with Soft Control and Visualization », *Touch Lab Report 7. RLE TR-619. MIT. The research laboratoty of Electronics*, Cambridge, 208 p.
- CHESHIRE, D. G., C. J. DEAN et M. A. EVANS.** 1999, « Haptic Modelling – A return to "Hands-on" Designing? », *Proc. Eurohaptics 2001*, p. 124-128.
- CONNOLLY, K. et J. ELLIOTT** 1972, « The evolution and ontogeny of hand function », dans *N. B. Jones, Ethological studies of Child Behavior*, London, Eastern Press.
- CORDIER, M. O.** 1986, « Connaissances incomplètes : raisonnement hypothétique et raisonnement par défaut », *PRC-GREGO Intelligence Artificielle*, 20-21 novembre, p. 51-88.
- CROSS, N., K. DORST et N. ROOZENBURG.** 1992, *Research in design thinking*, Delft, Pays-Bas, Delft University Press, 215 p.
- DEANGELIS, F., M. BORDEGONI, G. FRUGOLI et C. RIZZI.** 1997, « Realistic Haptic Rendering of Flexible Objects », dans *Proceedings of the Second PHANToM Users Group Workshop*, AI Lab Technical Report No. 1617 and RLE Technical Report No. 618, MIT, p. 30-34.
- DE NOBLET, J.** 1974. *Design : Introduction à l'histoire de l'évolution des formes industrielles de 1820 à aujourd'hui*, Chatelaudren, Stock, 383 p.

- DILLON, P., W. MOODY, R. BARTLETT, P. SCULLY, R. MORGAN et JAMES, C.** 2000, « Sensing the fabric ». *Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, First International Workshop, Glasgow, UK, p. 63-68.
- DUMAURIER, É.** 1992. *Psychologie expérimentale de la perception*, Paris, Presses Universitaires de France, 188 p.
- FUCHS, Ph., G. MOREAU, et J.-P. PAPIN.** 2001, *Le traité de la réalité virtuelle*, Paris, Les Presses de l'École des Mines, 517 p.
- GAUTHIER, Cl., J.-Fr. DESBIENS, A. MALO, St. MARTINEAU et D. SIMARD.** 1997, *Pour une théorie de la pédagogie : recherches contemporaines sur le savoir des enseignants*, Saint-Nicolas, Les Presses de l'Université Laval, 352 p.
- GAUVIN, R.** 1979, *Méthodologie du design*, 2<sup>e</sup> éd., Montréal, École Polytechnique de Montréal, 54 p.
- GERO, J. S. et M. A. ROSENMAN.** 1989, « A Conceptual Framework for Knowledge-Based Design Research at Sydney University's Design Computing Unit », dans AIENG, *AI in Design*, Cambridge, Royaume-Uni, p. 363-382.
- GIARDINA, M.** 1999, *L'interactivité, le multimédia et l'apprentissage*, Montréal, L'Harmattan, 236 p.
- GIBSON, J. J.** 1966, *The senses considered as perceptual systems*, Boston, Houghton Mifflin, 335 p.
- GIESS, C., S. TOPFER et H. P. MEINZER.** 2000, « Can Shadows Improve Haptic Interaction in Virtual Environments? », dans *Vision and Graphics*; Vol. 8, Konstanz: Hartung-Gorre (2000), p. 49-53.
- GLASS, G. V.** 1976, « Primary, secondary, and meta-analysis of research », *Educational Researcher*, vol. 5, n° 10, p. 3-8.
- GRADECKI, J.** 1994, *La réalité virtuelle par la pratique*, Paris, Sybex, 505 p.
- GREEN, B. F. et J. A. HALL.** 1984, « Quantitative methods for literature reviews », *Annual Review of Psychology*, vol. 35, p. 37-53.
- GREGORY, S. A.** 1966, *The Design Method*, Butterworths Pub., 331 p.
- GUILLAUME, P.** 1965, *La psychologie de la forme*, Paris, Flammarion, 234 p.
- GUTIERREZ, T., J. L. BARBERO, M. AIZPITARTE, A. R. CARILLO et A. EGUIDAZU.** 1998, « Assembly simulation through virtual prototypes », dans J. K. Salisbury et M. A. Srinivasan (Éds), *Proceedings of the Third PHANToM User's Group*, PUG98, p. 54-58.

- HATWELL, Y.** 1986, *Toucher l'espace : la main et la perception tactile de l'espace*, Lille : Presses Universitaires de Lille, 374 p.
- HO, C., C. BASDOGAN et M. A. SRINIVASAN.** 1999, « Efficient Point-Based Rendering Techniques for Haptic Display of Virtual Objects », *Presence* vol. 8, no.5, p. 477-491.
- HO, C., BASDOGAN, C., SLATER, M., DURLACH, N. et SRINIVASAN, M. A.** 1998, « An Experiment on the Influence of Haptic Communication on the Sense of Being Together », *International Workshop on Presence*, Ipswich, Suffolk, UK, 7 p.
- HOLLINS, M., G. L. PELLI, A. SEEGER et R. M. TAYLOR II,** 1998, « Perceptual Space for Texture Dimensions : What is the Metric? », *2nd PHANTOM Users Research Symposium 2000*, Zurich, Suisse 6 p.
- HUANG, Ch, Q. HUAMIN et A. E. KAUFMAN.** 1998, « Volume Rendering with Haptic Interaction », *Third PHANTOM Users Group Workshop*, 104 p.
- HUGES, B. et G. JANNSON.** 1994, « Texture perception via active touch. Special Issue: Perception-movement, information and dynamics », *Human Movement Science*, 13 (3-4), p. 301-333.
- IKEI, Y., K.WAKAMATSU et S. FUKUDA.** 1997, « Texture presentation by vibratory tactile display », *Virtual Reality Annual International Symposium*, Albuquerque, NM, 7 p. 199-207.
- IWATA, H., H. YANO et W. HASHIMOTO.** 1997, « LHX: An integrated software tool for haptic interface ». *Computers and Graphics*, vol. 21, n° 4, p. 413-420.
- INSENSEE, S. et J. RUDD.** 1996, *The art of rapid prototyping*, Boston, International Thomson Publishing, 1996, 243 p.
- JENICEK, M.** 1987, *Méta-analyse en médecine. Évaluation et synthèse de l'information clinique et épidémiologique*, Montmagny, Edisem, 152 p.
- KANT, I.** 1929, *The Critique of Pure Reason*, trans. Norman Kemp Smith, New York, St. Martin's Press, 150 p.
- KATZ, D.** 1989, *The world of touch*, Hillsdale (N. J.), Lawrence Erlbaum Associates Inc., 260 p.
- KAVALE, K. A. et G. V. GLASS.** 1981, « Meta-analysis and the integration of research in special education », *Journal of Learning Disabilities*, vol. 14, n° 9, p. 280- 289.

- KIRKPATRICK, A. E. et S. A. DOUGLAS.** 1996, « A Shape Recognition Benchmark for Evaluating Usability of Haptic Environment », *Haptic Human-Computer Interaction Workshop 2000*, Glasgow University p. 82-85.
- KIRKPATRICK, A. E. et S. A. DOUGLAS.** 1999, « Evaluating Haptic Interface in terms of interaction techniques », *Fourth PHANTOM Users Group Workshop*, p. 43-47.
- KOFFKA, K.** 1935, *Principles of Gestalt Psychology*. New York, Hartcourt, Brace and World.
- KOHLER, W.** 1964, *Psychologie de la forme*, première édition parue en 1929, St-Amand, Gallimard, 378 p.
- KRAEMER, H. C. et G. ANDREWS.** 1982, « A nonparametric technique for meta-analysis effect size calculation », *Psychol Bull*; vol. 91 no. 2, p. 404-412.
- LANDMAN, J. T. et R. M. DAWES.** 1982, « Psychotherapy outcome: Smith and Glass stand up under scrutiny », *American Psychologist*, vol. 37, p. 504-516.
- LANDSDOWN, J.** 1987, « The creative aspects of CAD: A possible approach », *Design Studies*, vol. 8, p. 76-80.
- LAWSON, B.** 1980, « How Designers Think », London, London : Architectural Press, 216. p.
- LAZZARI, M., M. L. MCLAUGHLIN, J. JASKOWIAK, W. L. WONG et M. AKBARIAN.** 2001, « A haptic exhibition of daguerreotype cases for USC's Fisher Gallery », dans M. L. McLaughlin, J. P. Hespanha, et G. S. Sukhatme (Éds), *Touch in Virtual Environments*, IMSC Series in Multimedia, New York, Prentice Hall, p. 260-269.
- LEBAHAR, J.-Ch.** 1994, *Le design industriel : Sémiologie de la séduction et code de la matière*, Marseille, Éditions Parenthèses, 125 p.
- LÉCUYER, Anatole.** 2001. « Contribution à l'étude des retours haptique et pseudo-haptique et de leur impact sur les simulations d'opération de montage / démontage en aéronautique », thèse de doctorat en informatique, Paris, Université de Paris XI, 224 p.
- LIN, M. C., A. GREGORY, S. EHMANN, S. GOTTSCHALK et R. TAYLOR.** 1999, « Contact Determination for Real-Time Haptic Interaction in 3D Modeling, Editing and Painting », *Fourth PHANTOM Users Group Workshop*, p. 59-62.

- MASSIE, T. H. et J. K. SALISBURY.** 1994, « The PHANToM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects », *Proceedings of the 1994 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Chicago, vol DSC 55-1, p. 295-302.
- MOR, A. B.** 1998, « 5 DOF force feedback using the 3 DOF PHANToM and a 2 DOF device », *Proceedings of the Third PHANToM Users Group, PUG98*. AI Technical Report n° 1643 and RLE Technical Report n° 624., p. 42-45.
- MARTEGANI, P.** 2000, *Digital design : New frontier for the objects*, Boston, Basel., 93 p.
- MCLAUGHLIN, M., J. P. HESPANHA et G. S. SUKHATME.** 2002, *Touch in virtual environments : Haptics and the design of interactive systems*, Upper Saddle River, Prentice-Hall, 269 p.
- MINTZ, J.** 1983, « Integrating research evidence : A commentary on meta-analysis ». *Journal of Consulting Psychology*, vol. 51, p. 71-75.
- MONGEAU, A.** 1994, « L'interactivité intelligente comme œuvre ouverte », Thèse de doctorat en communication Université du Québec à Montréal, Montréal, Université du Québec, 324 p.
- MORGAN, M. J.** 1977, *Molyneux' s Question, Vision, Touch and the Philosophy of Perception*, Cambridge, U.K. Cambridge University Press, 230p.
- MORIN, D.** 1987, « Méta-analyse des facteurs contribuant au maintien à court et à long terme de la suppression des comportements d'automutilation », maîtrise en psychologie, Montréal, Université du Québec à Montréal, 70 p.
- MORTON, A. H (éd.).** 1991, *The psychology of touch*, Hillsdale (N. J.), Lawrence Erlbaum Associates Inc., 354 p.
- MULLIN, M.** 1990, *Rapid Prototyping for Object-Oriented Systems*. Reading, M. A., Addison-Wesley, 303p.
- PAILLARD, J. (dir. publ.).** 1985, *La lecture sensorimotrice et cognitive de l'expérience spatiale*, Paris, Centre national de la recherche scientifique, 225 p.
- PENN, P., H. PETRIE, C. COLWELL, D. KONBROT, S. FURNER, et A. HARDWICK.** 1998, « The Perception of Texture, Object Size and Angularity by Touch in Virtual Environments with Two Devices », *Haptic Human-Computer Interaction Workshop 2000*, Glasgow University, p. 92-97.
- POTTS, A.** 2000, « Phantom – Based Haptic Interaction », *Proceedings of the Computer Science Discipline Seminar Conference*, Minnesota, University of Minnesota, 11 p.

- PIAGET, J.** 1961, *Les mécanismes perceptifs*, Paris, Presses Universitaires de France, 195p.
- PIÉRON, H.** 1967, *La sensation*, Paris, Presses Universitaires de France, collection « Que sais-je », 136 p.
- PIMENTEL, K. et K. TEIXEIRA.** 1994, *La réalité virtuelle*, trad. de l'anglais (américain) par Denis Jamet, Paris, Éditions Addison-Wesley, 340 p.
- QUARANTE, D.** 1944, *Éléments de design industriel*, 2<sup>e</sup> éd., Paris, Polytechnica, 640 p.
- QUÉAU, P.** 1986, *Éloge de la simulation*, Seyssel, Éditions du Champ Vallon, collection « Milieux », 259 p.
- RAY, C.** 1994, *Manufactured pleasures*, Manchester et New York, Manchester University Press, 178 p.
- REITER, R.** 1980, « A Logic for Default Reasoning », *AI*, vol. 13. p. 81-132.
- REVESZ, G.** 1950, *Psychology and art of the blind*, New York, Longmans, Green and Co.
- REYNE, M.** 1993, *Les prévisions technologiques*, Paris, Éditions d'Organisation, 181 p.
- ROCHAT, Ph.** 1984, *Vision et toucher chez l'enfant : la construction de paramètres spatiaux de l'objet*, Berne, Peter Lang S.A., 269 p.
- ROY, R. et D. WIELD.** 1986, *Products design and technological innovation*, Buckinghamshire, Philadelphia : Open University Press, Taylor & Francis, 322 p.
- SCHRAGE, M.** 1993, « The Culture(s) of Prototyping », *Design Management Journal* (réédition), vol. 4, p. 55-65.
- SCHRAGE, M.** 1999, *Serious play*, Boston, Mass., Harvard Business School Press, 245 p.
- SCHUMPETER, J.** 1989, *Essays : On Entrepreneurs, Innovations, Business Cycles, and the Evolution of Capitalism*, Transaction Publishers, New Brunswick (USA) & Oxford (UK), publication originale en 1951, Addison-Wesley.
- SensAble.** 1999, *GHOST SDK : Programmer's guide version 3.0 SensAble Technologies, inc.*, Standard Template Library (STL) code Copyright 1996, 1997 Silicon Graphics Computer Systems, Inc..

- SHAPIRO, D. A. et D. SHAPIRO.** 1982, « Meta-analysis of comparative therapy outcomes studies : a replication and refinement », *Psychological Bulletin*, vol. 92, p. 581-604.
- SMITH, M. L. et G. V. GLASS.** 1977, « Meta-analysis of psychotherapy outcome studies », *American Psychologist*, vol. 32, p.752-760.
- SNIBBE, S., S. ANDERSON et B. VERPLANK.** 1998, « Springs and constraints for 3D drawing », dans J. K. Salisbury et M. A. Srinivasan (Éds), *Proceedings of the Third PHANToM Users Group Workshop, PUG98*. AI Technical Report n° 1643 et RLE Technical Report n° 624. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, p. 59-62.
- SRINIVASAN, M. et C. BASDOGAN.** 1997, « Haptics in virtual environments : Taxonomy, research status, and challenges ». *Computers and Graphics*, vol. 21, n 4, 12 p.
- SRINIVASAN, M. A., C. BASDOGAN et C. HO.** 1999, « Haptic Interactions in the Real and Virtual World » dans *Design, Specification, and Verification of Interactive Systems '99*. J. Duke, A. Puerta (editors), 280 p.
- STRUBE, M. J. et D. P. HARTMAN.** 1983, Meta-analysis : techniques, applications, and functions, *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, vol. 51, p. 14-27.
- SWINSON, P. S. G.** 1982, « Logic Programming : a Computer Tool for the Architect of the Future ». *CAD*, vol. 14, n° 2 (mars), p. 97-104.
- VITRAC, J.-P.** 1984, *Comment gagner de nouveaux marchés par le design industriel*, Paris, Usine Nouvelle, 172 p.
- VURPILOT, E.** 1972, *Le monde visuel du jeune enfant*. Paris, Presses Universitaires de France, 400p.
- WALL, S. A. et W. S. HARWIN.** 2000, « Interaction of Visual and Haptic Information in Simulated Environments : Texture Perception », *Haptic Human-Computer Interaction Workshop 2000*, Glasgow University, p. 39-44.
- WEKKER L. M.** 1966, « On the basic properties of the mental image and a general approach to their analogue simulation », *Psychological Research in the USSR*. Moscou, Progress Publishers, p. 310-333.
- WILSON, G. T. et S. J., RANCH.** 1983, « Meta-analysis and the evaluation of psychotherapy outcome : limitations and liabilities », *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, vol. 51, p. 54-64.
- WOLF, L.** 1972, *Idéologie et production : le design*, Paris, Anthropos, 223 p.

**WU, W. C., C. BASDOGAN et M. A. SRINIVASAN.** 1999, « Visual Haptic and Bimodal Perception of Size and Stiffness in Virtual Environments», *dans ASME Dynamic Systems and Control Division*, (DSC-Vol.67), p. 19-26.

**WYDOUW, J.-Cl.** 1997, *Créativité : mode d'emploi*, Paris, Les Éditions D'organisation, 128 p.

**ZREIK, K.** 1991, *Sur la modélisation des processus de conception créative*, Paris, Éditions EUROPIA, 144 p.

### *Documents électroniques*

**Art of design.com.** *Prototypage Rapide : Tests aérodynamiques chez Jordan Grand Prix*, [En ligne], [http://www.art-of-design.com/aod-info/articles/articles/11\\_002ar.htm](http://www.art-of-design.com/aod-info/articles/articles/11_002ar.htm). (Page consultée le 9 octobre 2000).

**A. Q.** *Description et objectifs de l'atelier : analyse qualitative*, [En ligne], <http://www.unige.ch/ses/sococ/atel/qual/description.html>. (Page consultée le 9 juin 2003).

**BLIN, Ludovic.** 1999, « *La réalité virtuelle* », Mémoire Online, [En ligne], <http://memoireonline.free.fr/M%E9moire%20R%E9alit%E9%20virtuelle.html>. (Page consultée le 4 octobre 2000).

**CNRS.** *Gant Exosquelette à retour d'effort*. LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DE PARIS (LRP) – VELIZY, [En ligne], <http://www.cnrs.fr/diffusion/fototheq/vitrines/spi/spi2.html>. (Page consultée le 1<sup>er</sup> août 2003).

**CORDIEZ, J.** 2001, *Premier bilan après la manifestation*, [En ligne], <http://www.praktica.net/fr/pages/dossiers/dossiers.php3?p=3&d=6>. (Page consultée le 4 décembre 2001).

**DICTIONNAIRE DE L'INFORMATIQUE ET D'INTERNET.** [En ligne], <http://www.dicofr.com/>, (Page consultée le 13 octobre 2003).

**DICTIONNAIRE FRANCOPHONE DE L'INFORMATIQUE.** [En ligne], <http://www.ledico.net/>, (Page consultée le 13 octobre 2003).

**GATES, M., C. DOWDEN et S. L. BROWN.** « Les domaines de besoins du délinquant : "Comportement dans la collectivité" », [En ligne], <http://www.csc-scc.gc.ca/text/pblct/forum/e103/f103i.shtml>. (Page consultée le 7 juin 2003).

**Groupe de recherche en arts médiatiques.** 1996, *Dictionnaire des arts médiatiques*, UQAM, [En ligne], <http://www.comm.uqam.ca/~GRAM/C/illu/mul/muli54.html>. (Page consultée le 1<sup>er</sup> août 2003).

**HATWELL, STERI et GENTAZ.** 1997, cité dans Gentaz, Édouard. « *Du Toucher au système haptique manuel* », Institut de psychologie, [En ligne], [http://www.psych.univparis5.fr/recherche/labo\\_cog/Edouard/Intro.html](http://www.psych.univparis5.fr/recherche/labo_cog/Edouard/Intro.html). (Page consultée le 28 décembre 2000).

**Haptic Photo Gallery.** [En ligne], <http://haptic.mech.nwu.edu/intro/gallery/>. (Page consultée le 1<sup>er</sup> août 2003)

**Horizons.** [En ligne], [http://www.horizons.free.fr/rv/dossiers/frameworks\\_haptique.htm](http://www.horizons.free.fr/rv/dossiers/frameworks_haptique.htm). (Page consultée le 3 janvier 2003).

- Immersion Corporation - 3D Interaction: Products.** [En ligne], [http://www.immersion.com/3d/products/cyber\\_grasp.php](http://www.immersion.com/3d/products/cyber_grasp.php). (Page consultée le 16 octobre 2003).
- Innovation et avantage concurrentiel de l'offre d'Haption.** [En ligne], [ceavalorisation.com/scripts/home/publigen/content/templates/show.asp?P=116&L=FR](http://ceavalorisation.com/scripts/home/publigen/content/templates/show.asp?P=116&L=FR). (Page consultée le 15 octobre 2003).
- Laparoscopic Impulse Engine.** [En ligne], [http://www2.dcs.hull.ac.uk/simmod/Technology/LI\\_engine.htm](http://www2.dcs.hull.ac.uk/simmod/Technology/LI_engine.htm). (Page consultée le 15 octobre 2003).
- L'Immersion dans un environnement virtuel.** [En ligne], <http://w3imagis.imag.fr/Membres/Gilles.Debunne/Enseignement/RICM/PDF/InteractionRV.pdf>. (Page consultée le 1 août 2003).
- Logitech.** [En ligne], <http://www.logitech.com/> (Page consultée le 10 novembre 2003).
- MARTY, Robert.** *Sémiotique de l'obsolescence des formes*, Laboratoire de théorie des systèmes, 9 p., [En ligne], <http://www.univ-perp.fr/see/rch/lts/marty/design.htm>. (Page consultée le 5 décembre 2001).
- MCLAUGHLIN, M., G. SUKHATME, C. SHAHABI et J. HESPANHA.** 2000, *Use haptics for the Enhanced Museum Website-USC Interactive Art Museum*. University of Southern California Interactive Art Museum, [En ligne], <http://digimuse.usc.edu/MuseumRelatedResearch1.htm>. (Page consultée le 10 mai 2001).
- Novalis.** « *Dictionnaire des citations* », [En ligne], <http://www.dicocitations.com/cgi-bin/dicocitations.cgi?recherche>. (Page consultée le 2 janvier 2003).
- QUEFFELEC, C. N.** *Les déterminants de la forme*, 39 p., [En ligne], <http://christian.queffelec.free.fr/siteweb/cours/D1.htm>. (Page consultée le 26 octobre 2000).
- SensAble.** « Sensable technology; Products Specs », « Sensable technology; Application », « Sensable technology; PHANToM Desktop », [En ligne], <http://www.sensable.com/>. (Page consultée le 9 novembre 2003).
- Simteam,** « *Le PHANToM : caractéristiques techniques* », « *le PHANToM : retour d'effort et sens du toucher* », [En ligne], <http://www.simteam.com/>. (Page consultée le 1<sup>er</sup> août 2003).
- SJÖSTROM, C.** 1997, *The Phantasticon : The PHANToM for disabled children*, Suède, Center of Rehabilitation Engineering Research, Lund University. [En ligne], <http://www.certec.lth.se/doc/phantasticon1>. (Page consultée le 25 janvier 2003).

- STOUFF, Pierre.** « Je connais le monde par mes sens », *Les sens, porte d'entrée de la connaissance*, [En ligne], <http://perso.libertysurf.fr/pst/sutiufm/index.html>. (Page consultée le 5 janvier 2001).
- The Rutgers Master II, -New Design Force-Feedback Glove**, [En ligne], [http://www.caip.rutgers.edu/vrlab/publications/papers/2002\\_ieee\\_mech\\_bouzit.pdf](http://www.caip.rutgers.edu/vrlab/publications/papers/2002_ieee_mech_bouzit.pdf). (Page consultée le 15 octobre 2003).
- VAN DER MAREN, J. M.** 2002, Communication privée, courriel le 19 décembre 2002.
- Virtuose 3D**, [En ligne], <http://www.laas.fr/iarp-france/devices/virtuose3d.html>, (Page consultée le 15 octobre 2003).
- Virtual Realty Platform-PRV**, [En ligne], <http://www.inrialpes.fr/iramr/PRV/CATALOG/haptic.html>. (Page consultée le 15 octobre 2003).
- Vocabulaire de la santé**, [En ligne], <http://www.culture.gouv.fr/culture/dglf/coeter/03-06-03-Sante.htm>. (Page consultée le 15 octobre 2003).
- WAFFLARD, Alain.** 1998, *Création de modèles tridimensionnels pour la constitution d'une documentation commerciale*, [En ligne], <http://ww.wtcm.be/~pool5/pub/creat3d/verslag/welcome.html>. (Page consultée le 18 février 2003).
- WING, HAGGARD et FLANAGAN.** 1996, cité dans Édouard Gentaz, « *Du Toucher au système haptique manuel* », Institut de psychologie [En ligne], [http://www.psycho.univparis5.fr/recherche/labo\\_cog/Edouard/Intro.html](http://www.psycho.univparis5.fr/recherche/labo_cog/Edouard/Intro.html). (Page consultée le 28 décembre 2000).

## ANNEXE A

### Le PHANToM et ses caractéristiques techniques

#### Caractéristiques

|                                   |  |                     |
|-----------------------------------|--|---------------------|
| <b>Résolution en position</b>     | 860 dpi  | 0,03 mm             |
| <b>Espace de saisie</b>           | 7,5 x 10,5 x 15 po   | 19,5 x 27 x 37,5 cm |
| <b>Friction retour</b>            | 0,15 oz  | 0,04 N              |
| <b>Force maximum exercable</b>    | 1,9 lbf  | 8,5 N               |
| <b>Raideur</b>                    | 20 lbs/po  | 3,5 N/mm            |
| <b>Inertie</b>                    | < 0,17 lbm   | < 75 g              |
| <b>Encombrement</b>               | 10 x 13 po   | 25 x 33 cm          |
| <b>Interface ISA / PCI ou VME</b> |  |                     |
| <b>Retour de forces</b>           | 3 degrés de liberté (x, y, z)  |                     |
| <b>Position sensing</b>           | Standard : 3 degrés de liberté (x, y, z) standard avec encoder stylus<br>option : 6 degrés de liberté (x, y, z, yaw, pitch, roll)  |                     |
| <b>Exigences système</b>          | Intel et AMD based PCs<br>Windows XP, Windows 2000, Windows NT 4.0 SP6, ou Red Hat Linux 7.2<br>300 MHz Pentium processor<br>64 MB RAM<br>30 MB free disk space<br>Hardware graphics accelerator |                     |
|                                   | Silicon Graphics, Specified IRIX, 64 MB RAM, 30 MB free disk space<br>Hardware graphics accelerator<br>(SensAble)  |                     |

## ANNEXE B

### Méta-analyse : Tableau des recherches consultées

- (a) les textes considérés comme très pertinents.  
 (b) les textes qui correspondaient à certains de nos critères.  
 (c) les textes peu pertinent, qui s'éloignaient beaucoup de nos critères.  
 (blanc) les textes retenus  
 (gris) les textes rejetés

|                | Nom                                    | Prénom                                    | Université             | Pays                      | Département   | Titre de la recherche  | Année         |
|----------------|--|---|------------------------|---------------------------|---|--|---------------|
| 1 <sup>a</sup> | Basdogan<br>Srinivasan                 | Cagatay<br>Madayam<br>A.                  | MIT                    | E. U.                     | Jet Propulsion<br>Laboratory / Human<br>and Machine Haptics<br>and Research | Haptic Rendering in<br>Virtual Environments  | 2002<br>18 p. |
| 2 <sup>b</sup> | Basdogan<br>Ho<br>Srinivasan           | Cagatay<br>Chih-Hao<br>Madayam<br>A.      | MIT                    | E. U.                     | Human and Machine<br>Haptics and Research<br>/ Laboratory of<br>Electronics | Simulation of Tissue<br>Cutting and Bleeding for<br>Laparoscopic Surgery<br>Using Auxiliary Surfaces | 1999<br>8 p.  |
| 3 <sup>b</sup> | Basdogan<br>Ho<br>Srinivasan<br>Slater | Cagatay<br>Chih-Hao<br>Madayam<br>A., Mel | MIT, College<br>London | E. U.,<br>Royaume-<br>Uni |   | An Experimental Study<br>on the Role of Touch in<br>Shared Virtual<br>Environments                   | 2000<br>22 p. |
| 4 <sup>a</sup> | Biggs<br>Srinivasan                    | S. James<br>Madayam<br>A.                 | MIT                    | E. U.                     | Human and Machine<br>Haptics and Research                                   | Haptic Interfaces  | 2002<br>23 p. |

| Nom             | Prénom                       | Université                             | Pays        | Département   | Titre de la recherche  | Année          |
|-----------------|------------------------------|--|-------------|---|--|----------------|
| 5 <sup>a</sup>  | Brewster                     | Glasgow                                | Écosse      | Glasgow interactive Group / Computing Science                                       | The Impact "Touching" Technology on Cultural Applications  | 2001<br>11 p.  |
| 6 <sup>a</sup>  | Chen                         | SensAble Technologies Inc.             | E. U.       | SensAble Technologies Inc.  | Six Degree-of-Freedom Haptic System For Desktop Virtual Prototyping Applications                       | 1999<br>10 p.  |
| 7 <sup>a</sup>  | Chen Srinivasan              | MIT                                    | E. U.       | Electronics   | Human Haptic Interaction with Soft Control and Visualisation   | 1998<br>208 p. |
| 8 <sup>a</sup>  | Cheshire Dean Evans          | Stratfordshire, SensAble, Loughborough | Royaume-Uni | School of Engineering / SensAble Technologies / Department of Design and Technology | Haptic Modelling – A return to "Hands-on" Designing?   | 1999<br>23 p.  |
| 9 <sup>b</sup>  | Dang Annaswany Srinivasan    | MIT, Southwestern Medical Center TX.   | E. U.       | Human and Machine Haptics and Research / Physical Medicine & Rehabilitation         | Development and Evaluation of an Epidural Injection Simulator with Force Feedback for Medical Training | 2001<br>6 p.   |
| 10 <sup>b</sup> | De Boeck Raymaekers Vanreeth | Limburg University Centre              | Belgique    | Expertise Centre for Digital Media  | Introducing Touch in a Rigid Body Simulation Environment : a Design Overview                           | 1999<br>8 p.   |
| 12 <sup>a</sup> | Giess Topfer Meinser         | Heidelberg                             | Allemagne   | Division Medical and Biological Informatics   | Can Shadows Improve Haptic Interaction in Virtual Environments?  | 2000<br>6 p.   |

|                 | Nom   | Prénom                                     | Université                    | Pays  | Département   | Titre de la recherche  | Année         |
|-----------------|---|--|-------------------------------|-------|---|--|---------------|
| 13 <sup>b</sup> | Gregory<br>Lin<br>Gottschalk<br>Taylor            | A.<br>M. C.<br>S.<br>R.                    | North Carolina<br>Chapel Hill | E. U. | Computer Science  | Fast and Accurate<br>Collision Detection for<br>Haptic Interaction Using<br>a Three Degree-of-<br>Freedom Force-Feedback<br>Device | 1999<br>24 p. |
| 14 <sup>a</sup> | Hirose<br>Mori<br>Lee<br>Kanou                    | Shingo<br>Kasuo<br>Richard M.<br>Y. Yutaka |                               | Japon | Mechanical<br>Engineering / 3D<br>Laboratory / 3D<br>Incorporated           | A VR Three-Dimensional<br>Pottery Design system<br>Using PHANTOM Haptic<br>Devices   | 1998<br>4 p.  |
| 15 <sup>a</sup> | Ho<br>Basdogan<br>Slater<br>Dirlach<br>Srinivasan | C.<br>C.<br>M.<br>N.<br>M. A.              |                               | E. U. | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics | An Experiment on the<br>Influence of Haptic<br>Communication on the<br>Sense of Being Together                                     | 1998<br>7 p.  |
| 16 <sup>a</sup> | Ho<br>Basdogan,<br>Srinivasan                     | Chih-Hao<br>Casgatay<br>Madayam A.         |                               | E. U. | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics | Efficient Point-Based<br>Rendering Techniques for<br>Haptic Display of Virtual<br>Objects  | 1999<br>15 p. |
| 17 <sup>b</sup> | Ho<br>Basdogan<br>Srinivasan                      | Chih-Hao<br>Casgatay<br>Madayam A.         |                               | E. U. | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics | Ray-Based Haptic : Force<br>and Torque Interactions<br>Between a Line Probe and<br>3D Objects in Virtual<br>Environments           | 2000<br>16 p. |

|                 | Nom                              | Prénom                           | Université                 | Pays              | Département   | Titre de la recherche   | Année          |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|---|---|----------------|
| 18 <sup>a</sup> | Hollins Pelli Seeger Taylor II   | Mark Gabriele L. Adam Russell M. | North Carolina Chapel Hill | E. U.             | Psychology / Computer Science   | Perceptual Space for Texture Dimensions : What is the Metric?                           | 1998<br>6 p.   |
| 19 <sup>b</sup> | Hu Castellanos Tholey Desai      | Tie Andes E. Gregory Jaydev      | Philadelphia               | E. U.             | Robotics, Intelligent Sensing and Mechatronics                                  | Real-Time Haptic Feedback in Laparoscopic Tools for Use in Gastro-Intestinal Surgery    | 2002<br>8 p.   |
| 20 <sup>b</sup> | Hutchins                         | Matthew                          |                            | Australie         | Mathematical and Information Sciences   | A Constraint Equation Algebra as a Basis for Haptic Rendering                           | 2000<br>49 p.  |
| 21 <sup>c</sup> | Hou Srinivasan                   | I-Chun A. H. Madayam A.          | MIT                        | E. U.             | Laboratory of Electronics   | Multimodal Virtual Environments : Magic Toolkit and Visual-Haptic Interaction Paradigms | 1998<br>105 p. |
| 22 <sup>c</sup> | Jordan Mortensen Oliveira Slater | J. J. M. Mel                     | College London, MIT        | Angleterre, E. U. | Computer Science/Human and Mechanical Engineering and Laboratory of Electronics | An Experimental Study on the Role of Touch in Shared Virtual Environments               | 2002<br>4 p.   |

|                 | Nom  | Prénom  | Université                               | Pays   | Département                         | Titre de la recherche   | Année          |
|-----------------|--|---|--|--------|-------------------------------------|---|----------------|
| 23 <sup>b</sup> | Karason<br>Annaswamy<br>Srinivasan                   | S. Pall<br>Anurudha M.<br>Madayam A.            | MIT                                      | E. U.  | Laboratory of<br>Electronics        | Identification and Control<br>of Haptic Systems : A<br>Computational Theory                         | 1998<br>168 p. |
| 24 <sup>c</sup> | Karason<br>Annaswamy<br>Srinivasan                   | S. Pall<br>Anurudha M.<br>Madayam A.            | MIT                                      | E. U.  | Laboratory of<br>Electronics        | Encoding an Decoding of<br>Static Information in<br>Tactile Sensing Systems                         | 1999<br>22 p.  |
| 25 <sup>a</sup> | Kirkpatrick<br>Douglas                               | Arthur E.<br>Sarah A.                           | Oregon                                   | E. U.  | Computer and<br>Information Science | A Shape Recognition<br>Benchmark for Evaluating<br>Usability of a Haptic                            | 1996 3 p.      |
| 26 <sup>b</sup> | Lécuyer<br>Burkhardt<br>Coquillart<br>Coiffet        | Anatole<br>Jean-Marie<br>Sabine<br>Philippe     | EADSCCR<br>INRIA CNRS                    | France |                                     | "Boundary of Illusion" : an<br>Experiment of Sensory<br>Integration with a Pseudo-<br>Haptic System | 2001 8 p.      |
| 27 <sup>b</sup> | Lécuyer<br>Kheddar<br>Coquillart<br>Graux<br>Coiffet | Anataole<br>A.<br>Sabine<br>Ludovic<br>Philippe | EADSCCR Evry<br>INRIA<br>EADSCCR<br>CNRS | France |                                     | A Haptic Prototype for<br>Simulations of<br>Aeronautics Mounting /<br>Unmounting Operations         | 2001<br>6 p.   |
| 28 <sup>c</sup> | Liao<br>Srinivasan                                   | Jung-Chi<br>Madayam A.                          | MIT                                      | E. U.  | Laboratory of<br>Electronics        | Experimental Investigation<br>of Frictional Properties of<br>the Human Fingerpad                    | 1999<br>154 p. |

|                 | Nom                                      | Prénom   | Université                 | Pays   | Département           | Titre de la recherche   | Année       |
|-----------------|--|--|----------------------------|--------|-----------------------|---|-------------|
| 29 <sup>a</sup> | Lin, Gregory, Ehmann, Gottschalk, Taylor | Ming C. Arthur Stephen Stephen Russ                  | North Carolina Chapel Hill | E. U.  | Computer Science      | Contact Determination for Real-Time Haptic Interaction in 3D Modeling, Editing and Painting | 1999 4 p.   |
| 30 <sup>b</sup> | Massie                                   | Thomas   |                            | E. U.  |                       | A Tangible Goal for 3D Modeling   | 1998 5 p.   |
| 31 <sup>a</sup> | Massie Salisbury                         | Thomas H. J. K.                                      |                            | E. U.  |                       | The Phantom Haptic Interface : A device for Probing Virtual Objects                         | 1994 5 p.   |
| 32 <sup>b</sup> | McGee Gray Brewster                      | Marilyn R. Philip Stephen                            | Glasgow                    | Écosse | Computing Science     | Feeling Rough : Multimodal Perception of Virtual Roughness                                  | 2000 5 p.   |
| 33 <sup>b</sup> | Oakley McGee Brewster Gray               | Ian Marylin R. Stephen Philip                        | Glasgow                    | Écosse | Computing Science     | Putting the Feel in "Look and Feel"   | 2000 8 p.   |
| 34 <sup>c</sup> | Okamura                                  | Allison Mariko                                       | Stanford                   | E.U.   | Philosophy            | Haptic Exploration of Unknown Objects   | 2000 142 p. |
| 35 <sup>c</sup> | Okmura Costa Turner Richard Cutkosky     | Allison M. Michael A. Michael L. Christopher Mark R. | Standford                  | E.U.   | Dextrous Manipulation | Haptic Surface Exploration  | 1999 10 p.  |

|                 | Nom  | Prénom                                | Université             | Pays       | Département   | Titre de la recherche   | Année          |
|-----------------|--|---------------------------------------|------------------------|------------|---|---|----------------|
| 36 <sup>b</sup> | Prakash Kim Manivannam Srinivasan            | C. E. Jung. M. Madayam A.             | Singapore MIT          | E. U.      | Software Systems/Human and Machine Haptics and Research | A New Approach for the Synthesis of Glistening Effect in Deformable Anatomical Objects Displayed with Haptic Feedback | 2002<br>7 p.   |
| 37 <sup>a</sup> | Penn Petrie Colwell Kornbrot Furner Hardwick | Paul Helen Chetz Diana Stephen Andrew | Hertfordshire Hatfield | Angleterre | Sensory Disabilities Research Unit / BTexaCT Research   | The Perception of Texture, Object Size and Angularity by Touch in Virtual Environments with Two Devices.              | 1998<br>6 p.   |
| 38 <sup>c</sup> | Raju Srinivasan                              | Balasandra A. Madayam A.              | MIT                    | E. U.      | Laboratory of Electronics                               | Encoding an Decoding of Shape in Tactile Sensing  | 1999<br>104 p. |
| 39 <sup>c</sup> | Raymaekers Vansichem Van Reeth               | Chris Gert Frank                      | Linburg Centre         | Belgique   | Expertise centre for Digital Media                      | Using Haptic Feedback to Improve 2D Curve Creation with a 2.5D Pen-Like Metaphor                                      | 2000<br>8 p.   |
| 40 <sup>c</sup> | Riedel Burton                                | Beate A. Mike                         | Glasgow                | Écosse     | Psychology  | Perception of Gradient in Haptic Graphs : a Comparison of Virtual and Physical Stimuli                                | 2001<br>3 p.   |
| 41 <sup>c</sup> | Savchenko                                    | Vladimir                              | Kosei                  | Japon      | Faculty of computer and information science             | 3-D Geometric Modeller with Haptic Feedback : Engraving Simulation  | 1998<br>8 p.   |

|                 | Nom                          | Prénom                             | Université | Pays            | Département  | Titre de la recherche  | Année         |
|-----------------|------------------------------|------------------------------------|------------|-----------------|--|--|---------------|
| 42 <sup>a</sup> | Srinivasan<br>Basdogan<br>Ho | Madayam A.<br>Casgatay<br>Chih-Hao | MIT        | E. U.           | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics        | Haptic Interactions in the<br>Real and Virtual Worlds  | 1999<br>16 p. |
| 43 <sup>a</sup> | Srinivasan<br>Basdogan<br>Ho | Madayam A.<br>Casgatay<br>Chih-Hao | MIT        | E. U.           | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics        | Haptic Interactions in the<br>Real and Virtual Worlds  | 1999<br>8 p.  |
| 44 <sup>c</sup> | Stevens<br>Jennifer          | Brett<br>Jennifer                  | Portsmouth | Royaume-<br>Uni | Information Systems  | The Sense of Object-<br>Presence with Projection-<br>Augmented Models                                | 2000<br>3 p.  |
| 45 <sup>a</sup> | Wall<br>Harwin               | Steven A.<br>William S.            | Reading    | Royaume-<br>Uni | Cybernetics  | Interaction of Visual and<br>Haptic Information in<br>Simulated Environments :<br>Texture Perception | 2000<br>6 p.  |
| 46 <sup>a</sup> | Wu<br>Basdogan<br>Srinivasan | Wan-Chen<br>Casgatay<br>Madayam A. | MIT        | E. U.           | Human and Machine<br>Haptics and Research /<br>Laboratory of<br>Electronics        | Visual, Haptic and<br>Bimodal Perception of<br>Size and Stiffness in<br>Virtual Environments         | 1999<br>8 p.  |
| 47 <sup>a</sup> |                              |                                    | MIT        | E. U.           | Artificial Intelligence<br>Laboratory and<br>Research Laboratory<br>of Electronics | The First PHANToM<br>User's Group Workshop   | 1996<br>89 p. |

|                 | Nom   | Prénom | Université              | Pays  | Département   | Titre de la recherche                                   | Année          |
|-----------------|-------|--------|-------------------------|-------|---|---|----------------|
| 48 <sup>a</sup> |       |        | MIT                     | E. U. | Artificial Intelligence Laboratory and Research Laboratory of Electronics | Proceedings of the Second PHANToM User's Group Workshop | 1997<br>92 p.  |
| 49 <sup>a</sup> |       |        | MIT                     | E. U. | Artificial Intelligence Laboratory and Research Laboratory of Electronics | Proceedings of the Third PHANToM User's Group Workshop  | 1998<br>104 p. |
| 50 <sup>a</sup> |       |        | MIT                     | E. U. | Artificial Intelligence Laboratory and Research Laboratory of Electronics | Proceedings of the Fourth PHANToM User's Group Workshop | 1999<br>82 p.  |
| 51 <sup>a</sup> | Potts | Aimee  | University of Minnesota | E. U. |   | Phantom-Based Haptic Interaction                        | 2000<br>11 p.  |

## ANNEXE C

### Méta-analyse : Citations des textes consultés

- P1: *Haptic Rendering in Virtual Environments*  
(Basdogan, C., Srinivasan, M. A.)
- P2: *Haptic Interfaces*  
(Biggs, J. S., Srinivasan, M. A.)
- P3: *The Impact "Touching» Technology on Cultural Applications*  
(Brewster, Stephen)
- P4: *Six Degree-of-Freedom Haptic System for Desktop Virtual Prototyping Applications*  
(Chen, Elaine)
- P5: *Human Haptic Interaction with Soft Control and Visualisation*  
(Chen, J., Srinivasan, M. A.)
- P6: *Haptic Modelling – A Return to "Hands-on» Designing?*  
(Cheshire, D. G., Dean, C. J., Evans, M. A.)
- P7: *Can Shadows Improve Haptic Interaction in Virtual Environments?*  
(Giess, C., Topfer, S., Meinzer, H. P.)
- P9: *An Experiment on the Influence of Haptic Communication on the Sense of Being Together*  
(Ho, C., Basdogan, C., Slater, M., Durlach, N., Srinivasan, M. A.)
- P10: *Efficient Point-Based Rendering Techniques for Haptic Display of Virtual Objects*  
(Ho, C., Basdogan, C., Srinivasan, M. A.)
- P11: *Perceptual Space for Texture Dimensions : What is the Metric?*  
(Hollins, M., Pelli, G. L., Seeger, A., Taylor II, R. M.)
- P12: *A Shape Recognition Benchmark for Evaluating Usability of Haptic Environment*  
(Kirkpatrick, A. E., Douglas, S. A.)
- P13: *Contact Determination for Real-Time Haptic Interaction in 3D Modeling, Editing and Painting*  
(Lin, M. C., Gregory, A., Ehmann, S., Gottschalk, S., Taylor, R.)
- P14: *The PHANToM Haptic Interface : A device for Probing Virtual Objects*  
(Massie, T. H., Salisbury, J. K.)
- P15: *The Perception of Texture, Object Size and Angularity by Touch in Virtual Environments with Two Devices*  
(Penn, P., Petrie, H., Colwell, C., Konbrot, D., Furner, S., Hardwick, A.)
- P16: *Haptic Interactions in the Real and Virtual Worlds*  
(Srinivasan, M. A., Basdogan, C., Ho, C.)
- P18: *Interaction of Visual and Haptic Information in Simulated Environments : Texture Perception*  
(Wall, S. A., Harwin, W. S.)

P19: *Visual Haptic and Bimodal Perception of size and Stiffness in Virtual Environments*

(Wu, W. C., Basdogan, C., Srinivasan, M. A.)

P20: The First Users Group Workshop

P21: The Second Users Group Workshop

P22: The Third Users Group Workshop

P23: The Fourth Users Group Workshop

P24: *PHANToM-Based Haptic Interaction*

(Potts, Aimee)

## Citations de textes

### 1. LE DESIGN INDUSTRIEL

P 6:1

Codes: [le modèle 3D]

«As a profession involved in the definition of product form, industrial designers make extensive use of three dimensional (3D) models. These may vary in sophistication from relatively simple study models to full prototypes (Knoblauch 1958, p. 15; Kojima, 1991, p. 38). »

P 6:14

Codes: [texture surface]

«The production of the hammered effect was very closely associated with traditional hands-on modelling, whereby the designer controlled the manipulation of material whilst responding to tactile feedback. The capability to create the masked area was not expected, but the potential for this technique resulted in the emergence of a design opportunity that was quickly exploited. For students of industrial design, the findings of the case study indicate that haptic modelling has its limitations. Whilst the stylistic trends within industrial design require smooth, crisp surfaces, the authors feel that every effort should be made to undertake physical modelling using traditional fabrication techniques as they cannot be reproduced by haptic modelling. »

P 4:11

Codes: [utilisation]

«The quality and usability of virtual prototyping applications can be substantially improved by the integration of a 6DOF haptic device. »

P 4:7

Codes: [application]

«Preliminary results are promising and we believe that the desktop based workspace could have a great impact when used as a design aid in conjunction with a virtual prototyping application. »

### 1.1 Le modèle 3D

P22:7

Codes: [le modèle 3D]

« In recent years the Physical Mock-Ups are being replaced by Virtual Prototypes. In this way, computer data models are being used as the core part of the design process where the users can work on the same model and perform several analyses to validate the model. This allows reduced costs, lead time and better competition. Nowadays, the Virtual Prototypes have a broad range of utilities, but do not cover all the utilities provided by the physical models. One of these topics is the interface between the user and the model. The sense of touch is one of the most important human tools to perceive and analyze an object and it is something missing in the Virtual Prototypes. Haptic interfaces can add this missing piece and make more realistic the interaction between the user and the virtual world. »

P 4:1

Codes: [phantom]

« Le réalisme des applications de prototypage virtuel peut être grandement amélioré par l'emploi d'un système à retour d'effort à six degrés de liberté. Ce papier expose les contraintes de conception d'un tel dispositif, décrit un prototype de produit à retour d'effort à six degrés de liberté développé par SensAble Technologies Inc., et présente les avantages de cette solution au travers d'une application d'analyse de maintenabilité. »

P 4:2

Codes: [avantage haptique]

« The benefits are many and profound : reduced cycle time, reduced cost and increased flexibility facilitate a much more interactive, concurrent and efficient engineering process. »

P 6:2

Codes: [le modèle 3D]

« Students, however, need to actively develop their abilities in the manipulation of form, but this is of course happening at a time of increasing access and requirements to employ CAD and CAID, along with the potential to build physical models using remote model building. In response to these conflicting pressures, the emerging technology of digital modelling using a haptic feedback device may have the potential to develop and encourage the physical manipulation of form, albeit on a virtual level. Haptic feedback devices give the operator the "feel" of the virtual object. If the operator moves a cursor onto an object on seen via the monitor, they actually feel its presence via an electro-mechanical system attached to the pointing device. »

P 6:3

Codes: [le modèle 3D]

« The authors, having backgrounds as both design practitioners and educators, have explored the nature of haptic modelling, considering its potential for integration into industrial design practice and design education. »

P 6:7

Codes: [utilisation]

« Whilst CAID was available throughout the project, the industrial designer felt that the application of this technology was inappropriate at the concept generation stage due to the lack of spontaneity afforded by its modelling methods. »

P 6:13

Codes: [texture surface]

« At the beginning of the project, the expectations of the haptic modelling system were high. In fact they were too high. Assumptions were made that the modelling techniques would be very close to those of conventional foam and clay concept modelling. Unfortunately, the functionality of the software and hardware made it difficult to obtain the surface quality needed for both rendering and production. »

P 6:15

Codes: [utilisation]

« Indeed it maybe possible to use haptic modelling to practice on a virtual material before working on the real (and expensive) precious metal. »

P 4:10

Codes: [utilisation]

« In the design of any product, it is always important to ensure that it can be assembled and disassembled speedily and without problems. »

P22:3

Codes: [perception]

« On the other hand, a 3D CAD design of a mechanical assembly provides information about its size and components, but this information is insufficient to deduce the assembly or disassembly sequence. It is at this point where the Virtual Reality can have an important role, allowing the user to get into a “virtual world” by means of special tools (glasses, helmets, etc.) and simulate different assembly and maintenance operations of mechanical components. This would be a great aid for the designers and maintenance personnel. »

P22:6

Codes: [assemblage]

« 3.4. Assembly this capability is used to simulate the assembly / disassembly process of a mechanical component. All the other capabilities, Touch, Move and Collision detection, are enclosed here. The two specific assembly methods that have been developed are described below. Assembly two objects with three pairs of coincident surfaces. This method is used to simulate the assembly of two objects with three pairs of coincident surfaces (see the middle drawing of the figure 1). Each pair of surfaces is assembled consecutively. This algorithm consists of four phases :

1. The user moves himself by the working space until touching one of the objects.
2. This object is moved together with the user's finger until finding the first pair of coincident surfaces.
3. The object is slid (through sliding forces) along the coincident surface until finding the second pair of coincident surfaces.
4. The object is slid (through sliding forces) along the intersection line between the surfaces of the two pairs of coincident surfaces until finding the third pair of coincident surfaces.

Insert a pin in a hole. This method is used to simulate the insertion of an object “pin” in a hole, checking if the object “pin” collides with other objects of the working

space along its movement (see the last drawing of the figure 1). The hole can have any shape (circular, quadrangular, etc.) and can be a through all hole or not. The algorithm consists of three phases : 1. The user moves himself by the working space until touching the “pin” object. 2. The “pin” object is moved together with the user’s finger until finding a common assembly axis with the hole. 3. The “pin” object is slid (through sliding forces) along the assembly axis until the two objects are assembled. »

## 2. LA PERCEPTION

P12:14

Codes: [reconnaissance objet]

« Many users clearly have difficulty performing this basic task of shape recognition with a point force device. Given that perceiving shapes is a fundamental component of many tasks for which we might wish to use such devices, this difficulty represents a significant barrier to their usability. Understanding the various factors underlying this low rate of performance is crucial to the usability of environments incorporating point force haptic devices. In the future, we intend to study how long it takes individuals to reach skilled performance, what that level of that performance is, and what factors might facilitate spatial perception with a point force device for different user populations. We also would like to extend our set of reference shapes with edges, textures, and shapes that are between our five 85 basic shapes. This larger reference set will allow us to explore the effect of multiple factors on shape perception performance. »

P12:6

Codes: [reconnaissance objet]

« The central role of shape perception makes it an excellent benchmark task for evaluating the usability of haptic environments. The large body of shape recognition results for physical environments provides a base for comparison. The selection of a set of standard shapes is crucial to the success of such a benchmark. »

P12:12

Codes: [reconnaissance objet]

« These comparisons suggest that we have a considerable room for improvement of shape display in haptic environments. »

P 3:23

Codes: [conclusion culture]

« Conclusions touch plays a key role when examining objects in the real world but until recently it was not possible to use this realistically in virtual environments and computer-based displays. This has meant that some of these displays lacked realism and usefulness. Now haptic technologies are available that let museums add this missing aspect back into their computer-based exhibits. They allow the visual displays to be extended to make them more realistic, useful and engaging for visitors and scholars. This has many potential benefits for museums, for example in allowing greater access to rare and fragile objects, allowing access for people who live far away and cannot easily get the museum, improving the opportunities for blind and visually-impaired people, and increasing the number of artefacts on display.

Haptic devices have a lot to offer museums and are likely to have a big impact on the quality and usefulness of computer-based exhibits. »

P15:2

Codes: [perception]

« As Loomis and Lederman (1986) noted “Touch facilitates or makes possible virtually all motor activity, and permits the perception of nearby objects and spatial layout”. » (p. 31-32)

P15:15

Codes: [perception]

« Accuracy of the perception of angularity is optimal with the stylus : If the accuracy with which the users perceive the angularity of three-dimensional objects is paramount in an application, the stylus attachment should be used. »

P19:5

Codes: [perception]

« 4. Conclusions The results of the experiments described above show that the 3D perspective visual displays in VEs indeed generate visual and haptic illusions due to biases in perception such that the farther objects are perceived to be (1) shorter in length when there are only visual cues and (2) softer when there are only haptic cues. However, when both sensory cues are provided, sensory data is fused such that vision and touch compensate for bias due to each other. »

P20:2

Codes: [perception]

« 4. CONCLUSION Human haptic perception, as well as visual perception, is subject to characteristic distortions. We investigated this phenomenon to make the most of this human illusion for simplifying haptic displaying algorithms. We found that both the shape profile itself and the surface normal direction depict the apparent shape independently while haptic exploration. We can use both factors superimposed just like hump mapping in computer graphics techniques. »

P18:2

Codes: [aspect humain /interface]

« Touching an object’s surface often simultaneously yields information regarding the compliance, texture, shape and heat conductive qualities of the object. The touching process may also be perceived aurally, for example, a tap or scrape, and is usually supported by visual stimulus regarding the object’s global structure and surface properties. Indeed, it is this correlative information that has led researchers to hypothesize that touch is more of a “reality sense” than the other four human senses (Taylor, Lederman & Gibson, 1973). »

P 5:5

Codes: [perception]« The stimuli that have been used cover a wide variety such as point loads, surface irregularities, vibrotactile threshold, patterns, roughness, and texture. However, not much is known about the human discriminability of rubber-like soft objects. Early studies on softness perception existed in forms of stimuli ranking, scaling, and psychophysical laws: for example, studies on the skills of test bakers [27], cheese maker and grader craftsmanship, and on scaling, matching and cross-modal comparisons of softness perception [20]. »

P7:4

Codes: [perception]

« Methods. Wanger *et al.* tested in three experiments the influence of pictorial cues on perceived spatial relations in computer generated images [6]. They showed that the ability to perform spatial manipulation tasks is a function of both, the nature of the task and the visual information presented in the images. The experiments validated that the presence of shadows improves accuracy of positioning, aligning and scaling of objects in a virtual world. The experiment described in this paper examines whether this result can be applied to haptic environments. »

P 2:36

Codes: [interface]

« 1.3 Tactile Displays. While the display of net forces is appropriate for coarse object interaction, investigators have also recognized the need for more detailed displays within the regions of contact: In particular, the display of tactile information (e.g., force distributions for conveying information BIGGS AND SRINIVASAN on texture and slip), though technically difficult, has long been considered desirable for remote manipulation (Bliss & NIL, 1971). »

## 2.1 L'interaction haptique

P10:5

Codes: [interaction haptique]

Memos: [p10,05]

« Two important issues any haptic-interaction paradigm has to specify are (1) collision detection: the detection of collisions between the end point of the generic probe and the objects in the scene, and (2) collision response: the response to the detection of collision in terms of how the forces reflected to the user are computed. A good collision-detection algorithm not only reduces the computational time, but also helps in correctly displaying interaction forces to the human operator to make the haptic sensing of virtual objects more realistic. »

P13:3

Codes: [interaction haptique]

« System Requirements. Any contact determination algorithm or system for haptic rendering should be able to address the following requirements for smooth interaction in virtual prototyping and engineering design: (1) scalable performance on large complex model; (2) unstructured models that may deform over time due to forces or manipulation; (3) multiple contacts and close proximity; (4) extensibility and generality. »

P1:9

Codes: [temps réel]

« To describe the basic concepts of haptic interaction with dynamic objects, let us consider an example (see Figure 8a). Let us assume that the interactions are point-based again such that the user controls the dynamics of a floating object via only the tip point of the haptic probe. The new position and orientation of the object can be calculated using the equations that govern the dynamics of rigid body motion. »

P10:16

Codes: [interaction haptique]

«6. Conclusions. In this paper, we have proposed a new point-based haptic-interaction technique that enables the user to touch and feel 3-D polyhedral objects and their surface details. The technique contains the “neighborhood watch” algorithm, which is capable of handling both convex and concave objects. After the first contact, the average rendering time is almost constant for complex objects independent of the number of polygons used to represent the object. We have also proposed methods to simulate surface properties of objects in virtual environments. In comparison to the existing haptic-texturing techniques, our texturing technique enables the mapping of textures onto 3-D surfaces. With the suggested models, friction and textures can be easily combined to generate realistic simulations. Moreover, the suggested haptic interaction technique can be easily extended to simulate the dynamics of rigid and deformable objects. »

P 5:4

Codes: [aspects humain / interface]

«Even though the interaction is multimodal, we rely heavily on our hands to perceive object properties and control the interaction. This is because the tactile information originates directly from the finger-object contact interface as a result of contact forces imposed on the fingerpads. The mechanoreceptors underneath the skin respond to the imposed loading and the generated neural signals are transmitted to the brain through pathways of the central nervous system. To understand what information is available to the sensors underneath the skin, visualizing the contact process is an important step. In this study, therefore, a video microscopy system was built to visualize the contact region of the fingerpad with transparent objects. The image sequences obtained from fingerpad contact with rigid Plexiglas and transparent objects of different softness were observed and analyzed by applying various image processing techniques to extract contact information. At a behavioral level, human perception of the object properties related to the human haptic system have been studied in terms of the detection, discrimination, and recognition (see Sherrick & Cholewiak [37] and Loomis & Lederman [38] for a review). »

P 2:16

Codes: [aspect humain / interface]

«3.3 Aspects of the Human Haptic System That Have Special Relevance to VE Hardware. A few aspects of the human haptic system that pertain to the design of haptic interface hardware deserve special attention. The following points are addressed : 1. A haptic precision gradient suggests that interface hardware deployed at distal body segments (e g., fingertips) provides more benefit than interface hardware deployed proximally (e.g., shoulder). 2. A perceptual emphasis on transient stimuli suggests that users may tolerate considerable drift errors in haptic display hardware. 3. The human tendency to move the preferred hand with respect to the non preferred hand (rather than the world) suggests that two-handed interfaces offer significant advantages over one-handed. 4. The wide range of information transfer rates for different methods of manual communication suggests the importance of developing efficient "haptic languages» for interaction with virtual environments. »

P16:2

Codes: [aspect humain / interface]

« In particular, the human hand is a versatile organ that is able to press, grasp, squeeze or stroke objects; it can explore object properties such as surface texture, shape and softness; it can manipulate tools such as a pen or a jack-hammer. Being able to touch, feel, and manipulate objects in an environment, in addition to seeing (and/or hearing) them, gives a sense of compelling immersion in the environment that is otherwise not possible. Real or virtual environments where one is deprived of the touch and feel of objects, seem impoverished and seriously handicap human interaction capabilities. »

P 2:11

Codes: [physique]

« Limb Position and Motion. A large variety of psychophysical experiments have been conducted concerning the perception of limb position and motion (Clark & Horcb, 1986; Jones & Hunter, 1992). »

P 5:3

Codes: [perception]

« Our hands are a part of the human haptic system which is comprised of the biomechanical, sensorimotor and cognitive subsystems. Complete understanding of the human haptic system requires an analysis of the mechanics of contact together with other aspects of the system such as physiology, neuroscience and psychophysics. When we interact with objects in an environment, useful information is gathered from information sources involving visual, auditory, and haptic systems. Exploration or manipulation of objects generally involves multimodal perception and intersensory integration [15][46][48]. »

P 2:13

Codes: [physique]

« Perception of Contact Conditions and Object Properties. Although humans experience a large variety of tactile sensations when touching objects, these sensations are really combinations of a few building blocks. For simplicity, normal indentation, lateral skin stretch, relative tangential motion, and on are the primitives for conditions of contact with an object. Surface, shape (mm size), and compliance can be thought of as the primitives for the majority of object properties perceived by touch. The human perception of many of these primitives is through tactile information conveyed by mechanoreceptors in the skin. »

P 2:12

Codes: [physique]

« 12. Net Forces of Contact. When a person contacts or presses objects through active motion of the hand, the contact forces are sensed by both the tactile and kinesthetic sensory systems. »

P 2:17

Codes: [aspect humain / interface]

« 3.3.1 Distal to Proximal Gradient in Precision. Given the importance of the fingertips for manipulation, it is reasonable to use them as a reference for describing more proximal body segments. »

Viewed this way, one finds a consistent gradient in performance, such that the skin and segments closer to the fingertip can be sensed and controlled more precisely than those closer to the trunk. »

P16:3

Codes: [aspect humain / interface]

« In any task involving physical contact with an object, be it for exploration or manipulation, the surface and volumetric physical properties of the skin and subcutaneous tissues play important roles in its successful performance. »

P16:4

Codes: [aspect humain / interface]

« The compliance and frictional properties of the skin together with the sensory and motor capabilities of the hand enable both gliding over a surface to be explored without losing contact, as well as stably grasping smooth objects to be manipulated. The mechanical loading on the skin, the transmission of the mechanical signals through the skin, and their transduction by the cutaneous mechanoreceptors are all strongly dependent on the mechanical properties of the skin and subcutaneous tissues. »

P 2:19

Codes: [aspect humain / interface]

« Bimanual Frame of Reference. Humans naturally perform many manual tasks by setting a frame of reference with the no preferred hand (e.g., positioning a piece of paper) and then operating the preferred hand in this frame (e.g., writing on the paper, Guiard, 1987). This preference also affects the precision of a user's performance with haptic interlaces. »

P2:20

Codes: [aspect humain / interface]

« Participants can perform spatial input in about half as much time when the preferred hand operates in the frame of the no preferred hand. These results suggest that two-handed interfaces offer about a two-fold improvement in speed and accuracy. »

P 1:15

Codes: [maintenant]

« 8. Summary and Future. Computer haptics is concerned with the development of software algorithms that enable a user to touch, feel, and manipulate objects in virtual environments through a haptic interface. It primarily deals with the computation of forces to be displayed to the user in response to user's actions. »

P 1:14

Codes: [futur]

« In the future, the capabilities of haptic interface devices are expected to improve primarily in two ways : (1) improvements in both desktop and wearable interface devices in terms of factors such as inertia, friction, workspace volume, resolution, force range, and bandwidth; (2) development of tactile displays to simulate direct contact with objects, including temperature patterns. These are expected to result in multifinger, multihand, and even whole body displays, with heterogeneous devices connected across networks.

Even with the current rapid expansion of the capabilities of affordable computers, the needs of haptic rendering with more complex interface devices will continue to stretch computational resources. Currently, even with point-based rendering, the computational complexity of simulating the nonlinear dynamics of physical contact between an organ and a surgical tool as well as surrounding tissues is very high. »

P 9:8

Codes: [interaction avec deux utilisateurs]

« 5. Conclusions. This note reports an ongoing experiment to examine the extent to which haptic communication, in addition to the usual visual feedback, influences the sense of togetherness between remote participants in a shared VE. Preliminary results suggest that haptic feedback adds significantly to the sense of togetherness, as does gender (higher for females). Interestingly, togetherness also increases with the degree of “social anxiety” estimated for the other (unknown, remote) person by the subject. The reason for this is unknown, but it occurred in both experimental conditions. There is also a clear influence of haptic feedback on the performance of the task, and independently, in the presence of haptic feedback, the degree of togetherness also significantly improves task performance. The experiment remains to be completed, so the results above are certainly tentative. »

P 9:4

Codes: [interaction avec deux utilisateurs]

« It is likely that the addition of haptic modality to shared virtual environments having visual and/or auditory displays may increase the sense of “being together” and the quality of the interactions while performing collaborative tasks. »

## **2.2 La perception haptique et la perception visuelle**

P18:4

Codes: [aspects humain / interface]

« Information regarding object properties has been shown to be differentially salient under conditions of pure haptic exploration, and haptic and visual exploration. When visual information is readily available, global shape and structural cues become the defining properties of an object. Conversely, under purely haptic exploration, material cues such as texture and compliance have a greater significance. It was hypothesized that this was a result of the ease of encoding these properties (Klatzky, Lederman & Reed, 1987). Thus, shape information is easily extracted by visual means, whereas to gather this information haptically requires execution of the “contour following” exploratory procedure (EP) (Lederman & Klatzky, 1987), which puts a large demand on the observer’s memory for integration of temporally varying signals, and is also time consuming to perform. In contrast, the optimal EPs for extraction of compliance and texture – pressure and lateral motion, respectively, are simple and fast to execute. »

P19:2

Codes: [perception haptique / visuel]

« Ample evidence based on real world experiments has shown that visual information can alter the haptic perception of spatial properties like size, range, location, and shape (reviewed by Heller and Schiff, 1991). »

P 2:10

Codes: [besoin]

« Although these methods appear adequate for many tasks, they usually demand more visual attention than the same action would in the real world. A haptic interface is a more straightforward solution that may reduce the visual attention required of the user force feedback also can improve accuracy and rate of spatial input. »

P19:1

Codes: [discrimination]

« Virtual slots of varying length and buttons of varying stiffness were displayed to the subjects, who then were asked to discriminate their size and stiffness respectively using visual and/or haptic cues. The results of the size experiments show that under vision alone, farther objects are perceived to be smaller due to perspective cues and the addition of haptic feedback reduces this visual bias. Similarly, the results of the stiffness experiments show that compliant objects that are farther are perceived to be softer when there is only haptic feedback and the addition of visual feedback reduces this haptic bias. Hence, we conclude that our visual and haptic systems compensate for each other such that the sensory information that comes from visual and haptic channels is fused in an optimal manner. »

### **2.3 La reconnaissance de l'objet**

P23:2

Codes: [discrimination]

« Object recognition also requires the apprehension of the attributes of an object, an important haptic task in its own right. Understanding the factors determining the speed of haptic object recognition in the physical world will give us a basis for predicting the usability of interaction techniques for object recognition (and object attribute apprehension) in virtual environments. The factors determining the speed of haptic object recognition have been extensively studied. There are three key factors : the number of different attributes apprehended simultaneously, the number of fingers used to apprehend those attributes, and the gestures used to apprehend the attributes. Klatzky, Loomis, Lederman, Wake and Fujita (1993) studied the first two factors. With respect to the number of fingers used, they found that it took seven times longer for blindfolded participants to recognize an object using just a single, gloved finger than using unrestricted exploration with their hands. They concluded that the participants using a single finger took so much longer because they had to construct a model of the object's shape over time (temporal integration), whereas using both hands they could directly perceive overall object shape in a single gesture (spatial integration). Klatzky *et al.* (1993) also found that access to fewer object attributes reduced speed of recognition : participants took 1.5 to 2 times as long to recognize an object while wearing gloves versus when their bare fingertips could directly touch the object. This demonstrates the importance of material properties (including thermal cues and texture) in object recognition.

Factor analysis showed that material properties were most important when the participants could only touch the object with a single finger. Another research program (summarized in Lederman & Klatzky, 1996) demonstrated that the patterns of hand movement used by participants in object recognition experiments were also crucial determinants of the speed and accuracy of objects recognition. Lederman and Klatzky found that participants used specific, stereotyped hand movements, each associated with the apprehension of one or more haptic attributes, such as hardness, texture, or weight. They named these movements exploratory procedures (EP). They found two classes of such procedures : optimal procedures, for very accurate apprehension of a single attribute, and broad procedures, for coarse but rapid apprehension of several attributes. They concluded that rapid object recognition is a two-stage process, beginning with a broad EP to quickly categorize the object, followed by an optimal EP to precisely identify the object. We will consider the implications of this for the usability of the PHANToM in section 4. »

### 3. LA TECHNOLOGIE HAPTIQUE

P3:5

Codes: [technologie haptique]

« Haptic devices allow users to feel virtual objects [12]. Minsky *et al.* (in [1]) describe the technology thus : “Force display technology works by using mechanical actuators to apply forces to the user. By simulating the physics of the user’s virtual world, we can compute these forces in real-time, and then send them to the actuators so that the user feels them”. What this really means is a person using a haptic device can feel a simulation of a solid object as if it was really in front of them [16, 20]. »

P14:9

Codes: [simulation haptique]

« It is also possible to give these objects body properties such as mass, permitting objects to be pushed and bounced off the walls of the virtual environment. It has been shown to be relatively easy for users to distinguish between massive and low-mass objects by feel alone. By giving bodies stiffness relative to ground, virtual buttons have also been created which simulate the “fall-away” feeling of real switches. »

P 3:3

Codes: [technologie haptique]

« The distinction becomes important however when we attempt to describe the technology. In brief, a haptic device provides position input like a mouse but also stimulates the sense of touch by applying output to the user in the form of forces. Tactile devices affect the skin surface by stretching it or pulling it, for example. Force feedback devices affect the finger, hand, or body position and movement. »

P13:7

Codes: [interaction haptique]

« To deform and shape the model interactively, the user simply chooses the edit level (resolution) and attaches the probe to the surface. The real-time haptic display is rendered using GHOST and H-Collide.

The deformation update process uses the force vector currently being displayed by the PHANToM to move the current surface point at the selected edit level. »

P13:6

Codes: [interaction haptique]

« InTouch. InTouch is an interactive multiresolution modeling and 3D painting system with a haptic interface. An artist or a designer can use inTouch to create and refine a three-dimensional multiresolution polygonal mesh. Its appearance can be further enhanced by directly painting onto its surface.

The system allows users to naturally create complex forms and patterns not only aided by visual feedback but also by their sense of touch. »

P 2:21

Codes: [interface]

« 4. CURRENT HARDWARE. In performing tasks with a haptic interface, the human user conveys desired motor actions by physically manipulating the interface, which, in turn, displays tactual sensory information to the user by appropriately stimulating his or her tactile and kinesthetic sensory systems. Thus, in general, haptic interfaces can be viewed as having two b~ functions : (1) to measure the positions and contact forces (and time derivatives) of the user's (or other body parts) and (2) to display contact forces and positions (or their spatial and temporal distributions) to the user. Among these position (or kinematic) and contact force variables, the side of which ones are the motor action variables (i.e., inputs to the computer) and which are the sensory display variables (i.e., inputs to the human) depends on the hardware and software design as well as the tasks for which the interface is employed. Typically, the user's hand position is sensed by the interface and contact forces computed by rendering algorithms are displayed to the user. A primary classification of haptic interactions with real environments or VEs that affects interface design can be summarized as follows : (1) free motion, in which no physical contact is made with objects in the environment; (2) contact involving unbalanced resultant forces, such as pressing an object with a finger pad; (3) contact involving self-equilibrating forces, such as squeezing an object in a pinch grasp. Depending on the tasks for which is designed, some or all of these elements will have to be adequately simulated by the interface. »

P 2:42

Codes: [compréhension haptique]

« 5.3 Evaluation of Haptic Interfaces. Evaluation of haptic interfaces is crucial to judge their effectiveness and to isolate aspects that need improvement. However, such evaluations performed in the context of teleoperation have been so task specific that it has been impossible to derive useful generalizations and to form effective theoretical models based on these generalizations. There is a strong need to specify a set of elementary manual tasks (basis tasks) that can be used to evaluate and compare manual capabilities of a given system (human, robotic, VE) efficiently. »

P10:2

Codes: [compréhension haptique]

« Therefore, the development of efficient haptic-interaction techniques that can render arbitrary convex and concave 3-D objects in a time-critical manner becomes essential. We view the haptic rendering of virtual objects to consist of two parts : (1)

a haptic-interaction paradigm that defines the nature of the “haptic cursor” and its interaction with object surfaces, and (2), an object property display algorithm to render surface and material properties of objects through the repeated use of the haptic-interaction paradigm. Initial haptic-rendering methods focused on displaying simple object shapes.

Massie and Salisbury (1994) developed the PHANTOM haptic interface device and proposed a simple method for the haptic rendering of objects. In this haptic-interaction model, the user could interact with primitive 3-D objects in VEs through the end point of the haptic device, which is defined as the haptic interface point (HIP). »

P10:4

Codes: [compréhension haptique]

« One of the major concerns in haptic interaction is that the computational time usually increases with the number of polygons. In such a case, the quality of the haptic interaction will depend on the complexity of the environment. If the reflected forces cannot be updated at a sufficiently high rate, contact instabilities occur. »

P 2:4

Codes: [avantages haptique]

« Two way communication between the user and the computer enabled by force feedback would be absolutely necessary in order to simulate the “feel” of the organs or the clay as they are manipulated. In contrast to vision and hearing, haptics is the only modality that permits this bi-directional information transfer between the user and virtual environment. Current excitement in developing haptic interfaces arises from applications like these and others like those listed below (from Srinivasan & Basdogan, 1997). »

P 4:3

Codes: [limites haptiques]

« Assuming that the software issues can be addressed, the user is still limited by the human-computer interface. An ideal interface should provide an easy way to control the position and orientation of a virtual object in 3D space. It should also provide the user with useful object contact information. »

P 3:7

Codes: [limites haptique]

« One of the main limitations is that all contact is through a single point (like a single finger or a probe). There are no whole hand devices that yet provide high fidelity force-feedback. This limits the range of applications that haptic devices are currently good for. »

P 3:8

Codes: [problème haptique]

« A further problem is that cutaneous feedback (see Table 1) is very limited in most haptic devices as they stimulate the sense of touch by applying output to the user in the form of forces and movement. Subtle surface textures are normally perceived cutaneously as tiny deformations in the surface of the skin. This is very difficult to do mechanically and most haptic devices do not do it at all. »

P 1:16

Codes: [maintenant]

« Consequently, current haptic rendering algorithms have been developed mainly for simulating the net forces and torques of interaction and give the user the feeling of touching and manipulating objects through a stick or a rigid thimble. Point-base rendering that views the haptic cursor as a point in computing point-object interaction forces was developed first and is widely used. This was followed by ray-based rendering that computes line-object interaction forces and torques. »

P13:2

Codes: [algorithme]

« The system allows the user to naturally create complex forms by a sense of touch and to freely interact with the design space without specification of rigorous mathematics. »

P13:4

Codes: [algorithme]

« These requirements imply that the algorithms need to have the following characteristics : (1) the runtime should be independent of the model complexity; (2) it should work well on dynamic scenes, in addition to static environments; (3) it should be able to handle contacts rapidly and accurately to generate realistic forces for haptic interaction; (4) the data structure and the algorithmic framework should be applicable to a wide range of haptic devices and applications. »

### 3.1 LES INTERFACES HAPTQUES

P 2:39

Codes: [interface]

« Hardware for displaying distributed forces on the skin retraining an especially challenging problem. Exploration of novel technologies is needed for quantum improvements in rotary and linear actuators. Shape memory alloys (SMAA), microfluidics, and other system (MEMS) for tactile display all warrant further investigation. Mechanical flexibility is another major challenge in the development of general purpose wearable tactile displays. No human skin is a dynamic environment subject to bumps, scratches, and deformations due to flexion of the body segments. To put an array of actuators on it in a package that does not break or encumber an active user may require methods for manufacturing or embedding actuator arrays in flexible substrates, a challenge MEMS technology is only beginning to address. »

P 23:5

Codes: [interaction haptique]

« The interaction techniques supported by an interface can facilitate or hinder the use of each EP, in turn making the corresponding haptic property more or less perceptible. »

P 2:25

Codes: [interface]

« In contrast, an interface in the form of a tool handle, for which reconfigurability within a limited task domain is achieved through both hardware and software changes, is quite feasible. Thus, one of the basic distinctions among haptic interfaces is whether they attempt to approximate the ideal exoskeleton or employ the

toolhandle approach. Another distinction concerning haptic interfaces has to do with whether the device “grounds” forces on the body or on the world. A “body grounded” device, such as a hand exoskeleton, is capable of simulating some forces (e.g., the resistance of a tennis ball to squeezing with the thumb and forefinger), but cannot simulate all forces (e.g., the torque about the user’s shoulder due to the weight of the ball). In principle, a “world grounded”-device, such as a desktop robot could simulate both types of forces, but is generally not portable. User performance with the two types of force grounding have been compared for some tasks and found roughly equivalent. »

P 2:26

Codes: [interface]

« Current Technology. Compared to audio (see chap. 4, this volume) and video (see chap. 3, this volume) hardware, haptic interface hardware for VEs is in an early stage of development. »

P 2:27

Codes: [interface]

« A wide variety of devices are under development in companies and universities worldwide. A rough breakdown of major types of haptic interfaces that are currently available or being developed is as follows: 1. Ground-based devices Joysticks, mice, steering wheels, flight yokes ibol-based (pen or instrument). 2. Body-based devices Flexible (gloves and suits worn by user), Exoskeletal (jointed linkages affixed to user). 3. Tactile displays. »

P 2:28

Codes: [interface]

« 1.1 Ground-Based Devices. Joysticks are probably the oldest of these technologies and were originally conceived to control aircraft. Even the earliest of control sticks, connected by mechanical wires to the flight surfaces of a area, unwittingly presented force information about loads on flight surfaces to pilots. In general, these devices may be passive (i. e., not fame reflecting), as in joysticks used for cursor positioning, or active (i.e., force reflecting), as in many of today’s modern Sight-control sticks. Many ground-based devices are now commercially available. »

P 2:2

Codes: [interface]

« Active haptic interface, such as desktop robots and exoskeletal gloves with force feedback, are more sophisticated devices that have both sensors and actuators. In addition to transducing position and motion commands from the user, these devices can present controlled forces to the user, allowing him or her to feel virtual objects as well as control them. This chapter focuses on such devices. »

P 2:37

Codes: [interface]

« Tactile displays offer particularly difficult design challenges because of the high density of receptors in the skin to which they must apply the stimulus. Basic (1-DOF) tactile stimulators are now available for VEs, whereas tactile arrays for VEs are still in development. »

P18:3

Codes: [interface]

« Yet, touch sensations have proved impossible to replicate until the advent of haptic interfaces. Even with the current state of available technology, we are limited to simulations of “remote” contact via a probe or intermediary link, rather than direct stimulation of the fingerpads. »

P18:6

Codes: [interface]

« Given the bewildering level of sensitivity in the human cutaneous system, it seems unfeasible at present to suggest a mechanical skin interface that can relay information regarding object material properties. Currently, we can only strive to provide perceptual impressions that are merely discriminable (Fritz & Barner, 1996), or else provide simulation of object properties, such as roughness, rather than exact tactile replicas of real life materials. Most haptic interface applications, with the obvious exception of those designed for the visually impaired, seem to be augmented by visual feedback. »

P 2:41

Codes: [aspect humain / interface]

« The right balance of complexity and performance in system capabilities is generally task In particular, the fidelity with which tactual images, have to be displayed, and motor actions have to be sensed by the interface depends on the task, stimulation of other sensory modalities, and interaction between the modalities. Experimenting with available haptic interfaces, in conjunction with visual and auditory interfaces, is necessary to identify needed design improvements. Design compromises and tricks for achieving the required task performance capabilities or telepresence (immersion) need to be investigated (see chaps. 21, 22, and 40, this volume). The tricks might be the use of illusions (such as visual dominance) to fool the human user into believing a less than perfect multimodal display (DiFranco, Beauregard, & Srinivasan, 1997; Srinivasan, Beauregard, & Buck, 1996). Techniques such as filtering the user’s normal tremor or the use of sensory substitution within a modality (e.g., the use of tactile display to convey kinesthetic information) or among different modalities (e.g., visual display of a force) need to be developed to overcome limitations of devices and limitations of the human user, perhaps to achieve supernormal performance. To tackle the ever present time delays, efficient and reliable techniques for running model-based and real-time controls concurrently are needed. »

P12:2

Codes: [perception forme]

« Haptic interfaces are frequently claimed to permit “more natural” (and hence more usable) interactions than current WIMP interface styles. These claims are based upon analogies with physical environments, where vision and touch have complementary roles and touch is both a familiar and a necessary part of interaction. But do these analogies hold? »

P23:1

Codes: [interface]

« We argue that we must begin to incorporate more complete and integrated levels of human perception into haptic interface assessment. Previous work on haptic devices has used psychophysical protocols (for example Tan, 1997; von der Heyde & Hager-Ross, 1998), which focus on the device alone or on the device together with a highly stylized three-dimensional objects - for example, a user of the PHANToM could feel an object such as a Roman helmet from all sides – front, back, top, bottom – just as if holding it in his/her own hand. In our classification from Table 1, it (and the Wingman device below) is a force-feedback device as it applies forces to the user and can resist his/her movements or even move the user around. »

P4:5

Codes: [phantom]

« Allowing the user to move his or her hand freely on the desktop? Providing a sense of touch? Possessing six active degrees of freedom. »

P22:4

Codes: [perception]

« The user can touch any 3D object and move himself along its external surface, detecting edges and corners. In addition to the 3D object a point that indicates the position of the user's finger (the position of PHANToM) is visualized on the screen. »

P2:30

Codes: [interface]

« Pen-based force-reflecting interfaces are now mass-produce for general-purpose work. The Phantom (from SensAble Technologies) is a popular commercial desktop interface that comes in a variety of sizes, with either 3 or 6 actuated DOA At the time of this writing, units are in the price range of about (\$13,500-\$61,000). 3. Force-reflecting surgery simulators are also in mass production. The Immersion Laparoscopic Impulse Engine drives the tips of surgical tools to simulate laparoscopic procedures. »

P4:6

Codes: [phantom]

« While many of our early customers wanted a large workspace, it became clear that a large workspace directly translates into large arm movements, which can become tiring after a short time. It seems that there are two distinct markets that require different workspace sizes: a training and ergonomic analysis market, where a big workspace is required, and a design analysis market, where a desktop based workspace is more appropriate. »

P24:2

Codes: [phantom histoire]

« In 1993, J. K. Salisbury and Thomas Massie of SensAble Technologies introduced and commercialized the Personal Haptic Interface Mechanism, the PHANTOM. The Phantom haptic interface began the new field of research called computer haptics. It is defined as the discipline concerned with the techniques and processes associated with generating and displaying synthesized haptic stimuli [9]. The phantom allows

the user to interact with a variety of virtual objects. The device exerts an external force on the computer user with force feedback that gives the illusion of interaction with solid physical objects. The phantom is an electromechanical desktop device that connects to the computer's input / output port [8]. The user inserts a finger into a thimble or holds a stylus supported by a mechanical arm. The thimble or stylus will then track the motions and position of the user's fingertip while applying forces on the user. The phantom system is controlled by three direct current (DC) motors that have sensors and encoders attached to them. The number of motors corresponds to the number of degrees of freedom a particular phantom system has, although most systems produced have 3 motors.

The encoders track the user's motion or position along the x, y and z coordinates and the motors track the forces exerted on the user along the x, y and z axis. From the motors, there is a cable that connects to an aluminum linkage which connects to a passive gimbal which attaches to the thimble or stylus. A gimbal is a device that permits a body freedom of motion in any direction or suspends it so that it will remain level at all times. As explained later in the paper, because the three degrees of freedom meet at one contact point, no torque is measured, only force applied to the point. Friction and inertia must be constant to limit distractions of the user [6]. Also, the haptics system must be able to analyze and sense the forces applied by the user and then deliver the sensation back in real time. »

P24:4

Codes: [phantom critère]

« The first criterion is the user of the phantom must feel free in virtual space. There cannot be any external forces present and there must be low inertia and little friction. »

P24:5

Codes: [phantom critère]

« The second criterion is that the virtual objects must be perceived as stiff. The virtual object or surface can only be as stiff as the control algorithm allows it to be. »

P24:6

Codes: [phantom critère]

« The third criterion is that virtual walls must be solid or immovable to the user. This means that the force interface. While these methods exercise important aspects of device usability, particularly its resolution along a given haptic dimension, we believe that other crucial aspects of usability can only be understood using protocols that test the interaction techniques of an interface.

Interaction techniques are the most basic operations that still exercise the interface as a whole : the input devices, the graphics output, and the haptic output. »

P 2:6

Codes: [besoin]

« The need for active haptic interfaces clearly depends on the task at hand, and can be classified as follows : 1. Active Haptic interfaces are absolutely required for some tasks : Many medical procedures (for example, administering epidural anesthesia, palpating for cancerous lumps) are intrinsically haptic tasks. Haptic displays are required to simulate such tasks for training, because sensing of forces arising from tool-tissue interaction is critical for success.

Another intrinsically haptic VE task is testing the ease of manual assembly of complex mechanisms before they are manufactured (Nahvi, Nelson, Hollerbach, & Johnson, 1998). »

P 2:7

Codes: [besoin]

« 2. Active haptic interfaces can improve a user's sense of presence : Haptic interfaces with 2 or fewer actuated degrees of freedom are now mass-produced for playing PC video games, making them relatively cheap (about \$100 at the time of this writing), reliable, and easy to program. »

P 2:8

Codes: [besoin]

« Haptic cues have also been developed to augment graphical user interfaces to Windows operating systems, both Microsoft Windows (Immersion, 2000) and Linux / Unix. Free source code for haptic effects for desktops and games are available. Most manufacturers of general purpose, active interfaces also sell haptic authoring software. A few examples are the Ghost Toolkit for the Phantom (SensAble Technologies, 2000), Immersion Studio for the Feelit mouse (Immersion, 2000), and the VirtualHand Studio for the CyberGrasp force feedback glove (Virtual Technologies, Inc., 2000). Just one haptic interaction (for example, handling a real plate in a VE) can significantly improve a user's expectations about the solidity and weight of all objects in a VE (Hoflman,1998). 3. Active haptic interfaces can improve performance by providing natural constraints : In VEs, selecting and repositioning objects without haptic cues can be surprisingly difficult. Without force feedback, a user trying to set a simulated coffee mug down on a simulated table top is likely to merely push the mug through it. To overcome these difficulties, force-free interaction metaphors have been developed. »

P 2:9

Codes: [besoin]

« 4. Active haptic interfaces can reduce "Information clutter": Unlike speakers and video monitors, haptic displays don't generally clutter a user's environment with unnecessary information. A good example of this property is a pager-set to vibrate rather than beep. This haptic display Provides Only the right message ("You have a page"), to the right person (the owner), at the right time. This specificity is likely to become more important as embedded processors make more real-world objects intelligent and active. The same considerations suggest that haptic displays may reduce information clutter in VEs of increasing complexity. »

P 4:9

Codes: [observation]

« A third observation regards the shape of the end effector and how it is held in the hand. Holding the current end effector like a pen results in reduced control, since the amount of pinch force that the fingers can apply is reduced, making it possible for the handle to spin out of the hand. Holding it like a handle provides much better control, but it could awkward for fine manipulation. It may be desirable to change the shape of the end effector and the peak torque to match the unique needs of each application. »

P 2:34

Codes: [physique]

« 12. Booty-based Devices. Body-based devices fit over and move with the limbs or fingers of the user. Because they are kinematically similar to the arm and hands that they monitor and stimulate, they have the advantage of the widest range of unrestricted user motion. As position-measuring systems, body-based devices (gloves, suits, etc.) we relatively inexpensive and comfortable to use. »

P7:2

Codes: [interface haptique]

« Primary problems of haptic rendering are solved. It is expected that haptic devices will reach the desktop of usual computer users within the next years. However, there is still sonic work to do on the way from research prototypes to ergonomic and user friendly applications. »

P 3:9

Codes: [compréhension haptique]

« As McLaughlin *et al.* [14] say: “Our team believes that the ‘hands-off’ policies that museums must impose limit appreciation of three-dimensional objects, where full comprehension and understanding rely on the sense of 5 touch as well as vision. Haptic interfaces will allow fuller appreciation of three-dimensional objects without jeopardizing conservation standards.” »

P7:3

Codes: [succès haptique]

« One reason for the success and high acceptance of computer mice is the easy switching between them and the keyboard. 3D-devices have to fulfill the same requirement to get established. i.e. a better visualization is necessary so that the user will never get “lost in space”. Frequently changes between different types of application will become inconvenient if the user has constantly to put glasses on and drop them after a while. The user would like to choose for each task the most suitable input device without performing additional tasks. »

P 2:32

Codes: [interface]

« Notable applications of force-reflecting hand controllers to VEs include project GROPE at the University of North Carolina (Brooks, Ooh-Young, & Batter, 1990). In this simulator, the Argosme Mechanical Ann (ARM), and more recently the Phantom, were used successfully for force reflection during interactions with simulations of molecule docking. Haptic interactions with data from a scanning tunneling microscope have also been simulated (hylor, 1994). »

P24:3

Codes: [phantom]

« The phantom was designed under a few important considerations, first among them being: Force and motion. In the physical world we impose forces on ourselves whenever we touch anything. These forces and the position and motion of our hand and arms are transmitted to the brain as kinesthetic information [9]. This information along with cutaneous (touch) senses, force and motor capabilities are what allow us to touch and manipulate objects and relate them to the space around us. The phantom haptics system must also be able to interpret force and motion information.

It must be able to determine how objects move when forces are applied and also determine the geometry of the object (texture and friction of the surface of the object). Events tracking the change in position or motion of the probe, collision detection between the object and another object or the probe, explained later in the paper, are all important. The Phantom was designed with three degrees of freedom because very little torque (twisting-rotating) is involved with either the thimble or the stylus. Degrees of freedom are the directions the user can move in. For a user to touch all sides of a virtual 3-dimensional object the haptics system needs 3 degrees of freedom. Another 3 degrees of freedom are needed if a user wants to rotate the object freely. Because the first Phantom haptic interface that was created uses only 3 degrees of freedom, it allows the system to model those 3 degrees of freedom as a point contact in the virtual environment. This simplifies programming because with a point contact there is little torque, therefore it is less complex. These considerations were combined into three main criteria to attain a balanced, effective system. »

P22:5

Codes: [saisie haptique]

« Any object that can be touched can also be grasped and moved by the user. There are two types of movements: simple translations, when only one PHANToM is used, or general transformations including rotations, when two PHANToMs are used. The user can move his finger along the virtual workspace until touching an object (with one PHANToM) or grasping it (with two PHANToMs), from then on the object is moved together with the user's finger. The movement described by PHANToM (by the user's finger) is applied to the object in order to transform its position. In this case, the force sent PHANToM corresponds to the friction force (if only one PHANToM is used), or to the object weight (if two PHANToMs are used). This has required the implementation of some algorithms to calculate the volume and the area of any 3D object. »

P 3:6

Codes: [PHANToM]

« The main haptic device used in research is the PHANToM from SensAble Technologies [12] (see Figure 1). This is a very high resolution, six degrees-of-freedom (DOF) device in which the user holds the end of a motor-controlled, jointed arm (with respect to haptic devices, degrees-of-freedom refers to the number of dimensions of movement. For the PHANToM this is x,y,z dimensions plus pitch, roll and yaw). It provides a programmable sense of touch that allows users to feel textures and shapes of virtual objects, modulate and deform objects with a very high degree of realism. One of the key (and most compelling) features of the PHANToM is that it can model free-floating exerted by the user must be counteracted by the phantom system. »

P24::10

Codes: [phantom avantage]

« 2. Advantages of the Phantom Interface. The way that the phantom haptic interface has been designed gives it advantages over other haptic devices. Its size resembles a small desk lamp and its workspace is about the size of a mouse pad.

The size gives the user the ability to work with the device on their desktop while still having enough workspace to use it freely. Exoskeletal devices do not allow this much freedom of motion while at the same time having high fidelity. For example, gloves provide more degrees of freedom but with less precision. The system operates on point contact and has much higher fidelity; therefore it can be used for highly technological applications. The phantom setup allows the stylus or thimble to function as surgical tools, paint brushes or other tools depending on the application. Other devices do not allow for such wide ranges of use. »

P24:10

Codes: [phantom application]

« The fourth reason is that force feedback lets users continuously manipulate the objects [5]. The programs will then let the designers work with more creativity. »

P24:20

Codes: [phantom problème]

« Device configurations are not all the same, so acceptable interfaces and control standards must be agreed upon [3]. Otherwise, software developers may not know if their applications will operate the same on the devices they were designed for. As mentioned earlier, for the phantom to operate smoothly without vibrations the motors must constantly update their information. It is very difficult to update, control and display the visualization at the same time. As a result, if a person tries to operate the phantom too quickly and too much of the image is required to change, then the image will lag behind the motions of the user [4]. Many applications need multiple degrees of freedom, which is very complex. This is complicated by the need for real-time applications. Single point contact is nowhere near as powerful as whole hand haptic interaction, however, more research is needed because of its complexity. Price is certainly a limiting factor. About 10 years ago, the cost of the phantom haptic interface was near \$40,000. By 1997, the cost had dropped to about \$20,000 and today the phantoms price is stands at \$10,000 to \$15,000. Until the price drops significantly, it will continue to deter general acceptance. »

P23:3

Codes: [phantom problème]

« For example, with a single point force device such as the PHANToM, there is no way to contact an object at multiple points, so the enclosure EP (wrapping the hand around an object to apprehend its approximate shape) must be replaced by the contour following EP (running the PHANToM cursor around the contours of the object). If the attribute optimally apprehended by that EP can instead only be apprehended by other EPs less specific to that attribute, the effective resolution of that attribute is reduced. Continuing the example, since the contour following EP uses temporal integration rather than spatial integration and so is far slower than the enclosure EP, shape recognition will be less effective. The restriction is more stringent if the missing EP is the only one capable of apprehending an attribute: the attribute cannot be rendered in any meaningful way by the system at all. »

P 3:15

Codes: [problème haptique]

« One of the main problems with devices such as the PHANToM is cost. As they are so expensive it is impractical to use them on a large scale. »

As discussed above, prices are falling so this may not be a problem in the future. It is therefore important to investigate the use of such devices now. Another problem is reliability and robustness. Most of the devices are fairly reliable and robust because they have been built for games or other demanding environments. We have used our PHANToM devices at University open days and careers fairs many times with lots of people using them over long periods of time and have had few problems. However, they are always supervised by an attendant. This will be costly to do in a museum for a long period of time. »

P24:17

Codes: [phantom application]

« SensAble Technologies has sold over 500 phantom devices to major companies including Hasbro, Boeing and Honda [1]. At Adidas, designers sculpt shoes using SensAble FreeForm. Free Form is a new version of the phantom that allows simulation clay modeling. Adidas expects to design prototypes more easily, therefore reducing the time spent by as much as 80 %. »

P16:1

Codes: [application]

« Applications of this technology include a large variety of human activities such as training, education, entertainment, health care, scientific visualization, telecommunication, design, manufacturing and marketing. »

P 2:5

Codes: [application]

« \*Medicine: surgical simulators for medical training; manipulating micro and macro robots for minimally invasive surgery; remote diagnosis for telemedicine; aids for the disabled such as haptic interfaces for blind users. » (see chaps. 47-51, this volume).

\*Entertainment: video games and simulators that enable the user to feel and manipulate virtual solids, fluids, tools, and avatars (see chap. 55, this volume).

\* Education: giving students the feel of phenomena at nano, macro, or astronomical scales; “what if” scenarios for non terrestrial physics; experiencing complex data sets (see chaps. 45-46, this volume).

\*Industry: integration of haptics into CAD systems such that a designer can freely manipulate the mechanical components of an assembly in an immersive environment (see chaps. 52-54, this volume).

\* Graphic Arts: virtual art exhibits, concert rooms, and museums in which the user can login remotely to play the musical instruments, and to touch and feel the Haptic attributes of the displays; individual or cooperative virtual sculpting across the Internet. »

P 3:19

Codes: [application]

« Veterinary training applications The Department of Computing Science is working in collaboration with the School of Veterinary Medicine at Glasgow to provide a training system for vet students using haptics [4]. Medicine (in particular surgical training) was one of the first areas to adopt haptic technology [2], especially in the area of minimally-invasive surgery training.

Learning how to examine and operate on humans and animals is difficult and potentially dangerous for the patients. For the Vet School using a simulator. »

P 3:20

Codes: [avantages haptiques]

« Improves safety for the animals; reduces cost as fewer animals need to be kept at the School; Allows the students more time to practice examinations; provides access to rare or unusual cases that the student might not encounter during normal study. »

P 3:11

Codes: [application]

« Allow rare, fragile or dangerous objects to be handled. Objects which are very fragile, rare or dangerous may not be handled by museum visitors or scholars. Visual models can be created but there are many aspects of the object that this does not capture – for example, how heavy does it feel? How rough is its surface? To solve this problem objects could be haptically modeled and then visitors or researchers could feel them using a haptic device. This means that these objects can be made available to large numbers of people. »

P 3:12

Codes: [application]

« Allow long distance visitors there are many potential visitors to a museum who cannot get to visit. They might live far away or be immobile, for example. If objects are haptically modeled and then made available on a museum's Website then other access methods become possible. A school could buy a haptic device so that children can continue to feel and manipulate objects after they have been for a visit. A scholar could examine the haptic aspects of an object from a university across the world. With a haptic device at home a visitor could feel and manipulate the object via the Internet. »

P 3:13

Codes: [application]

« Improve access for visually disabled people. Visually impaired and blind people often lose-out when going to museums because objects are behind glass. There are over million people in the UK who are blind or partially-sighted [18]. The UK's Disability Discrimination Act legally requires museums to provide access for people with visual disabilities [9] but this can be very difficult to do. Some museums provide special exhibits that blind people can feel. However, these exhibits are usually small and may not contain the objects that the blind visitor is interested in (there is also the problem of fragility from the point above). With haptic technologies such visitors could feel and interact with a much wider range of objects, enriching their experiences in a museum. Many normally sighted users would also enjoy the opportunity to touch museum exhibits. »

P 3:14

Codes: [application]

« Increase the number of artefacts on display. With limited amounts of space, museums can only show a limited range of artefacts from their collections. If other objects that are not on show are modeled graphically and haptically then visitors could experience these on computer, without taking up museum space.

With several haptic devices, a museum could allow many people to feel objects at the same time, sharing the experience. »

P2:3

Codes: [recherche]

« Within approximately 10 years of significant research activity, commercial efforts have brought simple, active haptic interfaces into mass production. Research efforts on a range of more sophisticated devices have intensified. The success of these endeavors depends on finding application tasks where haptics adds significant value and, from a design viewpoint, on achieving an optimal balance between the human haptic ability to sense object properties, fidelity of the Interface device in delivering the appropriate mechanical signals, and computational complexity in rendering the signals in real time. »

P 2:38

Codes: [futur]

« 5. FUTURE WORK. Design specifications for haptic interfaces depend on the biomechanical, sensorimotor; and cognitive abilities of humans. Therefore, multidisciplinary studies involving biomechanical and psychophysical experiments together with computational models for both are needed in 5.2 Methods of Stimulations order to have a solid scientific basis for device design. Perhaps to a lesser extent, neurophysiological studies concerning peripheral and central neural representations and the processing of information in the human haptic system will also aid in design decisions concerning the kinds of information that need to be generated and how these should be displayed. A major barrier to progress the perspectives of biomechanics, psychophysics, and neuroscience has been the lack of robotic stimulators capable of delivering a large variety of stimuli under sufficiently precise motion and force control. »

P 1:15

Codes: [maintenant]

« 8. Summary and Future. Computer haptics is concerned with the development of software algorithms that enable a user to touch, feel, and manipulate objects in virtual environments through a haptic interface. It primarily deals with the computation of forces to be displayed to the user in response to user's actions. »

P14:1

Codes: [definition]

« A dominant focus in robotics research labs has traditionally been the development of autonomous systems – those which operate without human supervision or interaction. However, robotic systems which are under direct human control have begun to enjoy a resurgence of interest in recent years, in part due to advances in robot and human interface technologies. These new interactive systems (telerobotic) promise to expand the abilities of humans, by increasing physical strength, by improving manual dexterity, by augmenting the senses, and most intriguingly, by projecting human users in to remote or abstract environments. In this paper we focus on our work to develop a means for interacting with virtual mechanical objects; this is an important stepping stone toward the development of enhanced remote manipulation systems in which simultaneous interaction with real and virtual objects will be possible. »

P 1:17

Codes: [maintenant]

« Using these haptic interaction paradigms, real-time haptic display of shapes, textures, and friction of rigid and deformable objects has been achieved. Haptic rendering of dynamics of rigid objects, and to a lesser extent, linear dynamics of deformable objects has also been accomplished. Methods for recording and playing back haptic stimuli as well as algorithms for haptic interactions between multiple users in shared virtual environments are beginning to emerge. »

P 2:22

Codes: [interface]

« Note that an ideal interface, designed to provide realistic simulation of direct haptic exploration and manipulation of objects, would be able to simulate handling with a tool as well. Such an interface would measure the position and posture of the user's hand, display forces to the hand, and make use of a single hardware configuration (e.g., an exoskeleton with force and tactile-feedback) that could be adapted to different tasks by changes in software alone. »

P 1:18

Codes: [interaction avec deux utilisateurs]

« The rotation of the ring due to unbalanced forces applied by the participants was prevented to make the task easier. Moreover only the "simultaneous" haptic interactions were supported such that the ring did not move if both subjects did not apply sufficient forces to the ring at the same time. Figure 10. We developed a shared VR set-up that enables two people, at remote locations, to interact with each other through visual and haptic displays. »

P 1:19

Codes: [future]

« Thus there will be continued demand for efficient algorithms, especially when the haptic display needs to be synchronized with the display of visual, auditory, and other modalities. Similar to graphics accelerator cards used today, it is quite likely that much of the repetitive computations will need to be done through specialized electronic hardware perhaps through parallel processing. Given all the complexity and need for efficiency, in any given application the central question will be how good does the simulation needs to be to achieve a desired goal. »

### 3.2 LE RENDU HAPTIQUE

P22:2

Codes: [interface haptique]

« The tactile feedback for sensing virtual volumetric objects is involved in the haptic rendering – the process of feeling virtual objects. In general, the interaction required to control haptic interfaces can be described as a combination of real time volume rendering and a servo control loop. A high level description of this servo loop involves the following : 1: Locate the user's finger position with respect to the virtual environment. 2: Calculate a reaction force vector based on physical laws of the virtual environment. 3: Apply that force vector to the user's finger. 4: Go to 1. »

P22:1

Codes: [perception]

« Volume rendering with haptic interaction, based on volumetric objects, would be particularly useful when the user attempts to : precisely locate a feature within a volume; fly inside a volumetric object; understand the spatial arrangement of complex three-dimensional structures, or tactily operate on an object. »

P 1:11

Codes: [rendu haptique]

« 6. Recording and Playing-Back Haptic Stimuli. The concept of recording and playing back haptic stimuli (MacLean, 1996) to the user has some interesting applications. For example, the user equipped with a desktop haptic device may touch and feel the prerecorded textures of a car seat that is advertised by a car company over the Internet (this concept is similar to downloading a movie file and playing it on your screen).

In another application, pre-programmed haptic devices can be used in neuro-rehabilitation to improve the motor-control skills of patients with neurological disorders by displaying pre-recorded haptic trajectories (Krebs *et al.*, 1998). In both of these examples, the user will be a passive participant of the system though he/she may have some control over the device. As the user holds the end-effector of the device gently, the device guides his/her hand along pre-recorded shapes or paths. To describe the concept of haptic “play-back”, let us consider a simple example. Let us assume that our goal is to program a haptic device such that it will display a square shaped frame to a passive user. Here, we can consider the programming of a haptic device as a typical closed-loop control problem. Although this is a well-studied problem in robotics, the following practical issues appear when it is implemented with haptic devices. »

P 1:12

Codes: [rendu haptique]

« It is however possible to play back pre-recorded forces to the user even when the user is actively interacting with the environment by using visual cues. Dang, et al (2001) have developed an epidural injection-simulator in which a training feature is the capability to display an expert’s path and forces to the novice in two ways. The expert’s path is displayed visually either as a “tunnel” through which the novice could traverse or as a cursor moving along the pre-recorded path which the trainee needs to follow closely to feel the pre-recorded forces continuously. »

P10:6

Codes: [collision]

« In contrast, the purpose of collision detection in haptic rendering is not only to check collisions between objects, but more frequently to check collisions between the probe and virtual objects to compute the interaction forces. When simulating interactions between the probe and the objects, the reflected force typically increases with the penetration distance such that it resists the probe from further penetrating the object. »

P13:1

Codes: [collision]

« Collision detection and distance computation are important for a number of engineering applications including dynamic simulation, tolerance verification, object manipulation, motion planning and control. »

P10:7

Codes: [pénétration]

« Another approach to decide the depth of penetration is to use a constraint based method (Zilles & Salisbury, 1995). This method defines an imaginary point – the god-object point – that is constrained by the facets of the object. The penetration depth could then be defined as the distance from the god-object to the probe tip. This approach can be applied to polyhedral objects, even when the objects are thin. However, this method requires different sets of rules to handle concave and convex objects. »

P10:10

Codes: [pénétration]

« This method works well when the penetration of HIP is small compared to the size of the polygon. If the penetration depth is larger than the length of the edge of the contacted polygon, the users can still feel the existence of the edges. Force shading should be implemented appropriately depending on the geometry of the object that is being represented. It should be turned on to minimize the effects of artificial edges created by the polygonal representation, whereas it should be turned off when the objects have natural edges (e.g., the force-shading technique should be used to smooth the lateral surfaces of a circular cylinder made of polygons and not for the flat ends.). »

P 2:14

Codes: [perception]

« Among all the possible representations of the shapes of objects, the surface curvature distribution seems to be the most relevant for tactile sensing (LaMotte & Srinivasan, 1993; Srinivasan & LaMotte, 1991).

Human discriminability of compliance of objects depends on whether the object has a deformable or rigid surface (Srinivasan & LaMotte, 1995). When the surface is deformable, the spatial pressure distribution within the contact region is dependent on object compliance, and hence information from cutaneous mechanoreceptors is sufficient for discrimination of subtle differences in compliance. When the surface is rigid, kinesthetic information is necessary for discrimination, and the discriminability is much poorer than that for objects with deformable surfaces. For deformable objects with rigid surfaces held in a pinch grasp, the JND for compliance is about 5 % to 15 % when the displacement range is fixed, increases to 22 % when it is roved (varied randomly), and can be as high as 99 % when cues arising out of mechanical work done are eliminated (Tan *et al.*, 1992; Tan, Durlach, Shao, & We, 1993). Using a contralateral limb matching procedure involving the forearm, it has been found (Jones & Hunter, 1992) that the differential thresholds for stiffness and viscosity are 23 % and 34 %, respectively. It has been found that a stiffness of at least 25 N/mm is needed for an object to be perceived as by human observers (Clan *et al.*, 1994). See the tables in the Appendix for a summary of a results. »

P 1:7

Codes: [objet déformable]

« 4. Rendering of Deformable Objects Graphical display of deformable objects has been extensively studied in computer graphics. With the addition of haptic feedback, the deformable objects have gained a new characteristic. Now, our deformable models need to estimate not only the direction and the amount of deformation of each node of object but also the magnitude and direction of interaction forces that will be reflected to the user via a haptic device. One way to categorize the deformation techniques is according to the approach followed by the researchers to deform the surfaces : geometry or physics-based deformations. In geometry-based deformations, the object or the surrounding space is deformed, based purely on geometric manipulations. In general, the user manipulates vertices or control points that surround the 3D object to modify the shape of the object. In contrast, physics-based deformation techniques aim to model the physics involved in the motion and dynamics of interactions. These models simulate physical behavior of objects under the effect of external and internal forces. Geometry-based deformation techniques are faster, and are relatively easier to implement, but they do not necessarily simulate the underlying mechanics of deformation. Hence, the emphasis is on visual display and the goal is to make deformations more easily controllable and appear smooth to the user. Physics-based approaches, although necessary for simulating realistic behavior of deformable objects, are computationally expensive and not always suitable for real-time applications due to current limitations in computational power. In general, hybrid approaches that take advantage of both worlds seem to work well for many real-time applications. »

P 1:8

Codes: [temps réel]

« Displacement Model 5. Rendering of Dynamic Objects Simulating haptic interactions with 3D objects that translate and rotate over time is another challenge, which becomes computationally quite intensive if the objects collide with each other as well as with the haptic probe in real-time. »

P21:2

Codes: [objet déformable]

« 5. CONCLUSIONS The research work described in this paper is ongoing. The real-time simulation of non-rigid objects is appealing but the required computational power is not available yet in everyday computers. In some special cases it is however possible, under a number of assumptions and approximations, to haptically render objects using data precomputed off-line by a non-rigid material simulator, still obtaining results which are more realistic than the ones got modeling the object behavior by a primitive-based approach. »

P 1:10

Codes: [temps réel]

« Since the position and orientation of the object change at each time step, the updated coordinates of the object should be used to detect collisions with the new coordinates of the HIP. However, it would be computationally too expensive to update the object database at each time step to detect collisions with the new HIP.

A better strategy is to compute everything relative to the original coordinates and then apply the effects of transformation later (see the description in the legend for Figure 8). »

### 3.3 LA TEXTURE

P11:1

Codes: [texture]

« In previous research in our lab, before we started using a PHANTOM, multidimensional scaling (AIDS) was used to determine whether people impose any kind of dimensional structure on tactile surfaces [3]. An assortment of everyday stimuli, such as wood, styrofoam and corduroy was used. Subjects (with vision and hearing blocked) were presented with all possible pairs of 17 such stimuli, and were asked to give a magnitude estimate of the differentness of the two members of each pair. The results were clear in showing the predominance of two dimensions : a rough / smooth dimension and a hard/soft dimension. The data from some subjects showed that they were using a third dimension as well : sticky/slippery. »

P10:12

Codes: [texture surface]

#### 4.3 Texture

« Texturing techniques can be used to add roughness to a smooth surface. Similar to the role of textures in computer graphics, haptic textures can add complexity and realism to the existing geometry. Texturing techniques reduce the load on the geometry pipeline because they reduce the need for expressing texture geometry explicitly. In computer graphics, the final goal of the texturing computations is to decide the color in each pixel. Similarly, the final goal in haptic texturing is to decide the direction and magnitude of the force that will be reflected to the user. In order to simulate haptic textures, we need to know IHIP, HIP, and the height field that will be mapped to the surface. How to compute IHIP and HIP has already been described in Section 3, and how to map the height field over the object surfaces to simulate textures will be described in this section. »

P 1:6

Codes: [texture / maths]

« Procedural haptic texturing : The goal of procedural haptic texturing is to generate synthetic textures using mathematical functions. The function usually takes the coordinate  $(x,y,z)$  as the input and returns the height value and its gradient as the outputs. For example, several investigators have implemented the well-known noise texture (Perlin, 1985; Ebert *et al.* 1994) to generate stochastic haptic textures (Siira and Pai, 1996; Fritz and Barner, 1996; Basdogan *et al.*, 1997). Fractals are also appropriate for modeling natural textures since many objects seem to exhibit self-similarity (Mandelbrot, 1982). We have used the fractal concept in combination with the other texturing functions such as Fourier series and pink noise in various frequency and amplitude scales to generate more sophisticated surface details (Ho *et al.*, 1999). Similarly, several types of other graphical textures can be converted to haptic textures. For example, we (Ho *et al.*, 1999) have implemented haptic versions of reaction-diffusion textures (Turk, 1991; Witkin and Kass, 1991), the spot noise (Wijk, 1991), and cellular texture (Worley, 1996). »

P15:3

Codes: [rugosité]

« Texture perception in reality (Lederman *et al.*, 1972-1999) have conducted most of the contemporary work on roughness perception for real surface texture. In these experiments the stimuli were metal plates with equally spaced grooves cut or etched lengthways into them. The depth profile of such plates is that of a periodic rectangular waveform. Such textures are composed of three elements : amplitude (groove depth), groove width (the width of the groove itself); and land width (the spacing between the grooves). Magnitude estimations of the roughness of such stimuli have indicated that groove width constitutes the actual intensity of such textured stimuli and is the most significant determinant of the perceived roughness of real textures. With such textures perceived roughness increases as a function of increasing groove width, i. e. a positive exponent (e.g., Lederman, 1972). »

P15:4

Codes: [rugosité]

« The psychological theory underpinning this method states that the relationship between the perceived intensity of a psychological characteristic e.g. roughness, is related to the actual intensity of a physical characteristic of the stimuli raised to some power. »

P15:5

Codes: [rugosité]

« Direction of relationship between groove width and perceived roughness The relationship between the perceived roughness of the virtual textures and the geometry of those textures was, for the majority of individuals, the opposite of that found for the real textures used by Lederman & her coworkers. They found that perceived roughness increased as a function of increasing groove width (positive exponent), whereas in our virtual reality studies perceived roughness increased as a function of decreasing groove width (negative exponent). The effect of the endpoint device used The endpoint used with a specific device can exert a significant effect on the rate (exponent) at which perceived roughness changes as a function of increments in groove width. In effect, a given increase in a textures groove width can produce a greater or smaller increase in perceived roughness depending on the endpoint used. In the experiment involving the Phantom device it was found that the negative exponent was greater for the thimble than for the stylus endpoint for both blind and sighted participants. »

P 2:15

Codes: [perception]

« The perception of surface roughness of gratings is found to be solely due to the tactile sense and is dependent on groove width, contact force, and temperature but not scanning velocity (Loomis & Lederman, 1986). Some of the salient results on the perception of slip, microtexture, shape, compliance, and viscosity are given below. Humans can detect-the presence of a 2 pro high single dot on a smooth glass plate stroked on the skin, based on the responses of Meissner-type rapidly adapting fibers (RAs; LaMotte & Whitehouse, 1986; Srinivasan, Whitehouse, & LaMotte, 1990). »

P 5:1

Codes: [études]« The haptic interaction of humans with soft objects was studied from three perspectives : softness discrimination, force control, and contact visualization. The abilities of humans in actively discriminating softness was measured by using a specimen presenter system which was built to randomly present the specimens. Two experimental paradigms (1-and 2-finger) and three finger conditions (normal, finger cot, and rigid thimble) were used to examine the importance of various sources of information. »

P 1:1

Codes: [texture / douceur]

« 3. Rendering of Surface Details : Smooth Shapes, Friction and Texture Quite frequently, it is desirable to display object surfaces as smooth and continuous, even when a underlying polyhedral representation is employed. In computer graphics, for example, illumination models are used to compute the surface colour at a given point of a 3D object (Foley *et al.*, 1995). Then, shading algorithms are applied to shade each polygon by interpolating the light intensities (Gourand shading) or surface normal (Phong shading). Shading algorithms make the shared edges of the adjacent polygons invisible and provide the user with the display of visually smooth surfaces (Watt and Watt, 1992). One can integrate a similar approach into the study of haptics to convey the feel of haptically smooth object surfaces (Morgenbesser and Srinivasan, 1996; Fukui, 1996; Basdogan *et al.*, 1997; Ruspini *et al.*, 1997). By using force-shading technique suggested by Morgenbesser and Srinivasan (1996), we can reduce the force discontinuities and make the edges of polyhedral object feel smoother. To implement the force shading with polygonal surfaces (Basdogan *et al.*, 1997), we pre-compute the surface normal at each vertex by averaging the surface normals of neighboring polygons, weighted by their neighboring angles. During the real-time computations, we first detect the collision point that divides the contacted triangle into three sub-triangles. Then the surface normal (Ns) can be calculated at the collision point by averaging the normals of the vertices (Ni) of the contacted polygon, weighted by the areas Ai of the three sub-triangles. »

P 5:2

Codes: [perception]

« The results indicated that the errors from tracking with visual feedback was significantly lower than that without visual feedback. No significant differences in force control were found with either different softness or under the three finger conditions. The absolute errors were higher when controlling higher target forces. Significant difference in force control was found between the two hands of the subject who showed handedness in the softness discrimination experiments. »

P10:3

Codes: [texture / friction]

« In addition to the interaction paradigms described above, additional techniques have been proposed for displaying surface properties such as shape, friction, and texture of virtual objects. Morgenbesser and Srinivasan (1996) have proposed force-shading methods to smooth the feel of polyhedral objects by eliminating the force discontinuities at polygonal boundaries. Salcudean and Vlaar (1994), Salisbury *et al.* (1995), Chen *et al.* (1997) and Green and Salisbury (1997) have proposed techniques

to simulate friction on smooth surfaces. Minsky *et al.* (1990, 1995) have proposed algorithms to simulate textures on 2-D surfaces. Siira and Pai (1996) and Fritz and Barrier (1996) have also proposed methods to generate stochastic textures on well-defined surfaces. Basdogan *et al.* (1997) have developed techniques for the haptic texturing of polyhedral objects. »

P 1:2

Codes: [texture / friction]

« Haptic simulation of surface details such as friction and texture significantly improves the realism of virtual worlds. For example, friction is almost impossible to avoid in real life and virtual surfaces without friction feel “icy-smooth” when they are explored with a haptic device. Similarly, most of the surfaces in nature are covered with some type of texture that is sensed and distinguished quite well by our tactile system (Srinivasan *et al.*, 1990). Haptic texture is a combination of small-scale variations in surface geometry and its adhesive and frictional characteristics. However, displaying the detailed geometry of textures would be computationally too expensive. Instead, both friction and texture can be simulated by appropriate perturbations of the reaction force vector computed using nominal object geometry and material properties. The major difference between the friction and the texture simulation via a haptic device is that the friction model creates only forces tangential to the nominal surface in a direction opposite to the probe motion, while the texture model can generate both tangential and normal forces in any direction (see Figure 6). »

P18:9

Codes: [texture / friction]

« PERCEPTION OF ROUGHNESS. The relevant literature regarding perception of roughness can be subdivided in to three categories. Bimodal perception is concerned with perception of real textures via visual and haptic channels simultaneously. Remote contact, as opposed to direct contact with the finger pad, involves perception via a probe, finger sheath or other rigid link. It is possible to draw a direct analogy between sensations encountered in this mode, and when using a haptic interface. Finally, perception of roughness in a simulated environment is discussed. »

P14:10

Codes: [friction]

« One of the more subtle effects to simulate is friction. »

P10:11

Codes: [friction]

« Friction. As mentioned earlier, friction can be simulated by adding a lateral force vector to the normal force vector. »

P10:9

Codes: [friction]

« The simulation of static and dynamic friction gives users the feeling as if they are stroking the surface of sandpaper (Salisbury *et al.*, 1995). By changing the mean value of the friction coefficient and its variation, we can efficiently simulate various surfaces (Siira & Pai, 1996; Green & Salisbury, 1997). Textures can be simulated by simply mapping bumps and cavities onto the surface of objects. Minsky (1995) presented a method to simulate 2-D haptic textures by perturbing the direction of

reaction force. In contrast to the simulation of surface properties that add roughness to a smooth surface, the force-shading technique (Morgenbesser & Srinivasan, 1996; Basdogan *et al.*, 1997; Ruspini *et al.*, 1997) eliminates the surface roughness. When the objects are represented as polyhedrons, the surface normal and the force magnitude are usually discontinuous at the edges. By using the force-shading technique, we can reduce the force discontinuities and make the edges of polyhedral object feel smoother. »

P 1:5

Codes: [texture / 2d]

« In general, the haptic texturing techniques can be classified into two parts : (a) image-based and (b) procedural. Image-based haptic texturing : This class of haptic texturing deals with constructing a texture field from a 2D image data. In Computer Graphics, digital images are wrapped around 3D objects to make them look more realistic. While a graphical texture consists of 2D texels with only color or gray scale intensities, a haptic texture should consist of texels with a height value.

To display image-based haptic textures, the two-stage texture mapping technique of computer graphics (Bier and Sloan, 1986; Watt and Watt, 1992) can be followed. The first stage in this technique is to map the 2D image to a simple intermediate surface such as plane, cube, cylinder, or sphere. The second stage maps the texels from the intermediate surface to the object surface. Following this stage, one can easily access the height value at any point on the object surface. In addition, the gradient vector at any point can be estimated using a finite difference technique and interpolation scheme. Then, the force perturbation concept described above can be used to display image based haptic textures (see Ho *et al.*, 1999 for implementation details). »

P 1:4

Codes: [texture / 2d]

« Haptic perception and display of textures in virtual environments require a thorough investigation, primarily because the textures in nature come in various forms. Luckily, graphics texturing has been studied extensively and we can draw from that experience to simulate haptic textures in virtual environments. For example, bump mapping is a well-known technique in graphics for generating the appearance of a non smooth surface by perturbing the surface normals. Blinn (1978) initially proposed this technique as a method of graphically rendering 3D bumps for modeling clouds. His formulation depends on parameterization of the surface. Although the surface parameterization techniques have some advantages, they may generate uneven bump textures on the surface of complex shapes. Max and Becker (1994) suggested a direct method of mapping that does not require a transformation from global to parametric space. »

P23:5

Codes: [interaction haptique]

« The interaction techniques supported by an interface can facilitate or hinder the use of each EP, in turn making the corresponding haptic property more or less perceptible. »