

Interface Homme-Machine

Le retour haptique

Géry Casiez*

Octobre 2005

Introduction

Le principe de la réalité virtuelle est d'appréhender un monde abstrait, mathématique, de la même façon que le monde réel. Cette appréhension du virtuel, et de façon générale toute interface entre l'homme et la machine, passe obligatoirement par les capteurs du corps humain, à savoir les sens.

Pour la vision, il suffit de présenter une image 3D (voire deux images dans le cas de la vision stéréoscopique) pour pouvoir exciter ce sens de façon parfaitement analogue au réel. Quelle que soit la technologie employée, le périphérique se présente toujours sous la forme d'un écran (CRT, cristaux liquides, plasma...), au besoin miniature s'il est incorporé dans un casque.

Pour l'ouïe, il suffit de créer une vibration de l'air pour exciter le tympan. Là encore, un seul type de périphérique est vraiment exploité : le haut parleur. Eventuellement, quatre haut-parleurs suffisent à reproduire correctement les environnements sonores à simuler.

Le goût et l'odorat, deux sens fortement liés, nécessitent la fabrication de diverses molécules connues. On imagine qu'il est difficile de concevoir un périphérique capable d'exciter ces sens : soit on libère des molécules déjà prêtes, soit on les synthétise ! Ces deux sens ne semblent pourtant réellement utiles que pour quelques applications bien spécifiques. Les recherches n'en sont qu'aux prémises.

Le toucher est l'un des premiers sens développés chez le nouveau né. Il est pourtant très complexe, car regroupant des sensations basées sur des phénomènes physiques très différents. De plus, ces phénomènes correspondent à des signaux de fréquences propres très disparates. L'étude du retour haptique regroupe toutes les études traitant de la restitution des sensations de toucher.

1 Le retour haptique

1.1 Définition

Le terme haptique vient du mot grec *haptain* qui signifie toucher. Il est défini dans le Larousse par ce « qui concerne la sensibilité cutanée » et l'« étude scientifique du toucher ». Dans l'usage, le terme haptique est utilisé pour parler de deux types de retour sensoriels : le *retour*

*<http://www.lifl.fr/~casiez>

d'effort ou *retour kinesthésique* et le *retour tactile*. Le premier est relatif à la perception des forces de contact, de dureté, de poids et d'inertie d'un objet. Ce type de retour qui contraint les mouvements, sollicite les muscles, tendons et articulations. Le *retour tactile*, quant à lui, concerne la perception des états de surface (rugosité, texture), de température, des glissements, de détection des arêtes.

1.2 Caractéristiques physiologiques

Contrairement aux autres sens qui sont très localisés, le toucher concerne toute la surface extérieure du corps humain avec plus ou moins de sensibilité. D'après la figure 1, nous pouvons remarquer que des parties du corps comme l'épaule sont très peu représentées dans les cortex sensitifs et moteurs alors que la main et en particulier les doigts sont largement présents en raison du nombre important de capteurs sensitifs qu'ils possèdent. Pour ces raisons et pour des raisons pragmatiques d'utilisation, les interfaces haptiques vont généralement être contrôlées par les mains et les doigts. Nous allons nous intéresser plus en détails aux récepteurs présents sous la peau des mains et des doigts.

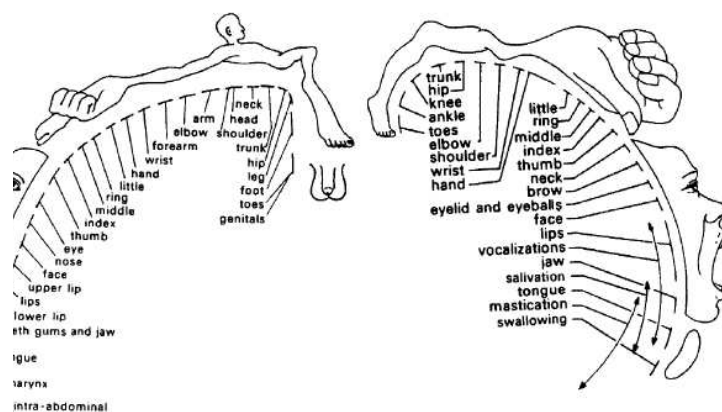


FIG. 1 – Homunculus - Représentation des différentes parties du corps déformées selon la place qu'ils occupent dans les cortex sensitif (gauche) et moteur (droite)

1.2.1 Physiologie du toucher

Sous la peau se trouvent divers capteurs en concentration plus ou moins grande. Il existe cinq types de capteurs spécialisés suivant le type de stimulus : terminaisons nerveuses, corpuscules de Meissner, disques de Merkel, corpuscules de Pacini et corpuscules de Ruffini (fig. 2). Les terminaisons nerveuses, proches de la surface de la peau, sont sensibles à la douleur (nocicepteurs). Les autres récepteurs réagissent aux excitations mécaniques (mécanorécepteurs). Parmi ceux-ci, les corpuscules de Meissner, situés juste en dessous de l'épiderme, représentent environ 40% des récepteurs tactiles de la main. Comme ils bougent avec le derme de la peau, ceux-ci sont bien adaptés pour détecter les mouvements à travers la peau (discontinuités de surface, géométrie de surface) et fonctionnent comme capteurs de vitesse. Les disques de Merkel représentent 25% des récepteurs de la main et sont principalement utilisés comme capteurs de pression mais peuvent également être sensibles aux vibrations. Les corpuscules de Pacini, représentant 13% des récepteurs de la main, sont situés plus profondément dans la peau. Ils fonctionnent comme détecteurs d'accélération et sont également sensibles aux vibrations. Finalement les corpuscules de Ruffini, sensibles à l'intensité et à la direction de forces statiques,

tout comme aux déformations de la peau et la chaleur (thermorécepteurs) représentent 19% des récepteurs de la main.

Sous la peau se trouvent en effet divers capteurs (fig. 2) en concentration plus ou moins grande. Ces capteurs permettent de détecter :

- orientation de la surface
- chaleur
- pression mécanique
- électricité
- frottement
- vibrations

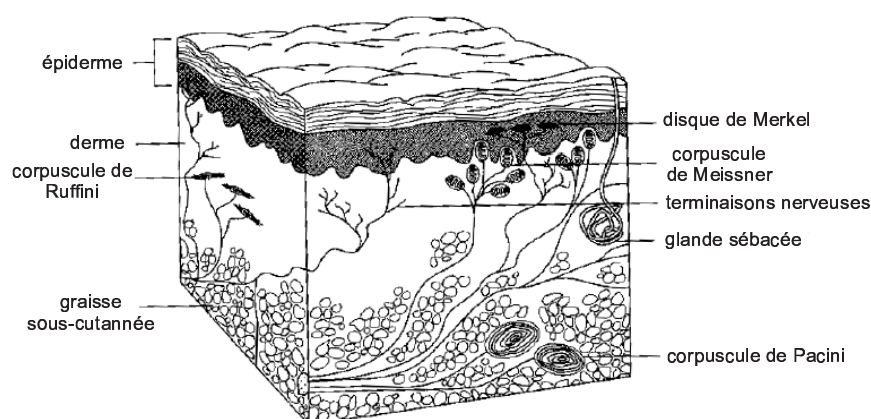


FIG. 2 – Structure de la peau [Adapté d'après E.B. Goldstein, *Sensation and Perception*, 1999, p. 408].

La résolution spatiale des récepteurs joue également sur la sensibilité du toucher. Des expériences ont ainsi montré que le seuil minimal de discrimination (JND^1) entre deux points au niveau du doigt est de 0,7 à 1,0 mm.

1.2.2 Physiologie du retour kinesthésique

Les récepteurs physiologiques sensibles au retour kinesthésique sont situés au niveau des tendons d'attache des muscles aux os, au niveau des articulations et dans les muscles. Les organes de Golgi sont ainsi situés entre les muscles et les tendons correspondants. Ils mesurent les forces et règlent la contraction des muscles. Des récepteurs sont aussi présents entre les fibres musculaires dans tout le muscle. Ceux-ci mesurent l'étirement entre les fibres musculaires et mesurent de cette façon le taux d'élongation du muscle. La fatigue du muscle intervient également dans la perception de la force. Les récepteurs de la peau participent par ailleurs à la perception du retour kinesthésique. La bande passante de ces capteurs est située entre 20 et 30 Hz.

Nous pouvons par ailleurs distinguer le *retour extéroceptif* du *retour proprioceptif*. Le premier concerne la mesure et la perception des phénomènes extérieurs au corps humain (chocs, poids et raideur d'un objet) alors que le second concerne les phénomènes internes à son propre corps (position des membres, verticalité du corps).

¹Just Noticeable Difference : variation minimale d'intensité que l'on perçoit pour un stimulus donné.

Ainsi, en ce qui concerne les différentes parties du corps, le JND en position du poignet est de $2,0^\circ$ et celui du doigt $2,5^\circ$. Le JND sur la raideur d'un objet est de 22%, celui sur le poids de 10% et celui en force de contact entre 5% et 15%. La force maximale contrôlable par les doigts varie entre 50 et 100N. Cette force dépend des muscles utilisés (muscles des doigts uniquement ou muscles du bras également) mais la gamme de force typique lors d'opérations d'exploration et de manipulation se situe entre 5 et 15 N. Enfin, la résolution de contrôle d'une force est d'environ 0,04 N.

1.3 La restitution du toucher

Vues les caractéristiques du toucher, il est nécessaire de distinguer deux types d'informations à restituer :

- *le retour d'effort ou retour kinesthésique* : prend en charge les forces de contact, la dureté, le poids et l'inertie d'un objet. Il sollicite les muscles, tendons et articulations.
- *le retour tactile* : prend en charge les états de surface (rugosité), la température, les glissements, la détection des arêtes. On s'intéresse ici moins à la force reçue qu'à sa répartition spatiale. La résolution spatiale à l'extrémité d'un doigt est de 1 mm en général.

Par abus de langage, on emploie souvent l'un ou l'autre terme pour désigner la restitution du toucher. Le terme exact qu'il faut employer pour désigner ces deux aspects est *retour haptique*.

On peut également distinguer le *toucher passif* du *toucher actif*. Le premier réfère à la sensibilité cutanée induite par la pression, la température ou la douleur quand les objets arrivent en contact direct avec la peau. Le second est utilisé pour explorer les propriétés des objets et pour interagir avec notre environnement.

Dans une application, il faut toujours se poser la question de l'utilité d'un retour haptique. En effet :

- la discipline est encore au stade de la recherche,
- elle engendre un surcoût non négligeable (de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers d'euros) non seulement pour les périphériques, mais aussi pour le calcul supplémentaire que la simulation devra exécuter.
- le retour d'effort est potentiellement dangereux pour l'utilisateur s'il est trop puissant et mal contrôlé.

Il faut donc autant que possible s'en passer. Par exemple, pour simuler une collision, le simple fait d'afficher à l'écran une dominante rouge suffit largement à provoquer une réaction chez l'utilisateur (qui n'a pas un peu souffert lorsque son personnage est touché dans un jeu comme *QUAKE* ?). Par contre, certaines tâches ne sont correctement réalisées que lorsque le toucher est restitué : la prise d'un objet est un exemple possible. Pour être plus convaincu, il suffirait de chausser les pattes d'un chien ou d'un chat pour se persuader que les informations de contact avec le sol sont absolument nécessaires à leur déplacement ! Certaines études ont confirmé qu'en téléopération, la manipulation d'objet à distance était nettement plus efficace s'il y avait un retour haptique.

Les premières études ont commencé en 1954 au laboratoire National Argonne. Elles concernaient la téléopération pour le nucléaire. Ce prototype a été récupéré par l'université de Caroline

du Nord à Chapel-Hill, pour la simulation moléculaire et a fait l'objet d'études de 1965 jusqu'au début des années 90. A partir de là, les études de dispositifs à retour haptique se sont multipliées partout dans le monde.

1.4 Les applications

On peut citer entre autres :

- *Médecine* : simulateurs chirurgicaux, manipulation de micro et macro robots pour la chirurgie minimale invasive, diagnostics à distance pour la télé médecine, aide pour les handicapés (ex : interfaces haptiques pour les aveugles : interfaces braille, substitution sensorielle).
- *Jeux* : jeux vidéos et simulateurs qui permettent à l'utilisateur de sentir différents effets suivant la situation. Par exemple, les volants à retour de force dans les simulateurs de conduite renvoient une force à l'utilisateur qui dépend de la vitesse du véhicule et de l'état de la route.
- *Enseignement* : donner par exemple la possibilité aux étudiants de sentir un phénomène aux échelles nanoscopiques, macroscopiques ou astronomiques.
- *Industrie* : intégration de l'haptique dans les logiciels de CAO pour permettre à l'utilisateur de ressentir les forces de collision lors d'assemblage de pièces. Simulation d'opérations de montage/démontage de pièces. Téléopération (contrôle d'une machine située sur un site distant ou dans un environnement hostile).
- *Art* : musées dans lesquels l'utilisateur peut toucher les objets, sculpture individuelle ou collective sur internet. Par exemple, le logiciel FreeForm de Sensable permet à l'utilisateur de sculpter des virtuellement des objets.

2 La partie matérielle : les technologies possibles

On peut produire des forces soit à distance soit par contact. Les forces à distance sont généralement peu employées car elles sont soit trop faibles (électromagnétiques) soit non maîtrisables (gravitation). Les forces de contact, à cause du principe d'action/réaction, nécessitent de prendre appui soit sur le corps humain (mais attention à la fatigue due au poids du dispositif), soit sur un socle fixe (limitation en débattement). On parle alors de périphérique à base fixe ou de périphérique à base non fixe. Les périphériques sont donc forcément spécifiques à une application.

2.1 Cas du retour d'effort

On dresse dans cette section une liste (non exhaustive) des principes physiques permettant de restituer et contrôler une force.

- *électromagnétique* : difficile à stabiliser, avantage de l'action à distance. De plus c'est l'une des seules techniques qui génère une force sans avoir à générer un mouvement.
- *hydraulique* : attention danger car l'effort retourné est très puissant. Salissant et cher.

- *pneumatique* : moins dangereux que l'hydraulique, car l'air est plus élastique. La largeur de bande passante pour le contrôle est plus faible que l'hydraulique, mais encore suffisante pour la main.
- *piézo-électrique* : certains cristaux ont la propriété de se déformer lorsqu'on les soumet à une tension, et de reprendre leur forme originelle à tension nulle.
- *frottement* : le procédé consiste à contrôler des freins. Cette technique se contente de s'opposer à un mouvement sans en créer elle-même. Elle est donc *passive*.
- *moteurs* : diverses technologies de moteurs sont exploitables :
 - ◇ courant continu : à une tension donnée correspond un couple moteur. Lors d'un effort continu, il est impossible de fournir le couple maximal du moteur sous peine de destruction ! C'est la technologie la plus employée à l'heure actuelle pour produire du retour d'effort parce qu'ils sont faciles à commander.
 - ◇ piézo-électrique : Leur caractéristique principale est d'avoir un couple massique important, ce qui en fait des actionneurs de choix pour le retour d'effort. Malheureusement, la commande de ces actionneurs pour le retour d'effort en est encore au stade de la recherche.
 - ◇ brushless : cette technologie consiste en une série d'électroaimants disposés en cercle. En contrôlant le courant passant dans ces électroaimants, on peut obtenir un couple constant quelque soit la position du rotor du moteur.
- *fluides électrorhéologiques* : certains fluides ont une consistance dépendante du champ électrique dans lequel ils sont placés. Cette technique est récente et ne semble pas encore exploitée pour des systèmes à retour haptique.
- *fluides magnéto-rhéologiques* : l'excitation du fluide rhéologique par un champ magnétique le transforme en une phase presque solide en quelques milli-secondes. Cette technologie en est encore au stage de la recherche.
- *Alliages à mémoire de forme* : les A.M.F. regroupent un ensemble d'alliages métalliques qui ont comme propriété de se déformer sous l'effet de la chaleur. Cette technologie est peu utilisée pour le retour d'effort.
- *Polymères électroactifs* : ces polymères peuvent subir jusqu'à 300% de déformation sous l'effet d'un champ électrique. Cette technologie en est encore au stage de la recherche.

2.2 Cas du retour tactile

Les techniques précédentes peuvent être également employées pour le retour tactile, lorsqu'un signal périodique les contrôle. On peut employer des solutions :

- vibro-tactiles à base de vibrateurs électromécaniques

- pneumatiques
- par matrice d'aiguilles : c'est le même système que les périphériques pour la lecture du braille, c'est à dire un ensemble de micro-tiges qui se déplacent.
- piézo-électrique : une onde stationnaire parcourt une surface et permet de ressentir un effet d'indentation lors du déplacement du doigt sur cette surface. Les effets ressentis sont de l'ordre du micro-mètre.
- électro-tactiles qui consiste à envoyer des impulsions électriques sur la peau
- à base d'impulsions neuro-musculaires où le signal est directement envoyé dans le cortex primaire de l'utilisateur !

Ces deux dernières solutions sont très risquées et donc non utilisées.

2.3 Cas particulier de la température

Il s'agit de contrôler efficacement et rapidement la température, avec un maximum de sécurité pour l'utilisateur. Une solution déjà employée se base sur des pompes à chaleur à effet Peltier. Pour cela, on fixe ensemble deux conducteurs différents. Lorsque l'on fait passer un courant dans un sens on refroidit à la jonction l'un des matériaux pour réchauffer l'autre. Si le courant passe dans l'autre sens, on obtient l'effet inverse. La différence de température est proportionnelle au courant. Il est donc facile de contrôler la température de la surface en contact. L'homme est capable de détecter des variations de température de $0,01^{\circ}\text{C/s}$ avec des temps de réaction de 300 à 900 ms.

3 La partie logicielle

3.1 Architecture d'un système à retour haptique

L'intégration du retour haptique comprend plusieurs étapes : d'une part, la création d'un environnement virtuel capable de simuler des phénomènes physiques plus ou moins réalistes et de calculer des forces ; et d'autre part, la commande de l'interface haptique pour rendre ces efforts à l'utilisateur. Nous allons voir les méthodes existantes et les contraintes pour réaliser ces deux étapes.

Plus précisément, les différentes étapes schématisées sur la figure 3 se décomposent de la manière suivante :

1. Acquisition de la position de l'effecteur par les capteurs de position de l'interface et mise à jour de la position de l'objet manipulé dans l'environnement virtuel.
2. Détection de collisions entre l'objet manipulé (ou l'avatar du doigt ou de la main) et les autres éléments de la scène virtuelle.
3. Calcul du retour d'effort. Dans le cas d'une collision, le moteur physique de l'environnement virtuel calcule une force de réaction qui peut être modifiée pour rajouter des effets de texture par exemple.
4. Envoi des consignes de forces à l'interface haptique. L'interface haptique applique les courants nécessaires aux moteurs.

5. L'utilisateur ressent alors un effort sur sa main grâce à ses capteurs cutanés et kinesthésiques. Ces informations vont être acheminées au cerveau qui va envoyer des commandes aux muscles. Les muscles font alors bouger l'effecteur et nous recommençons à la première étape.

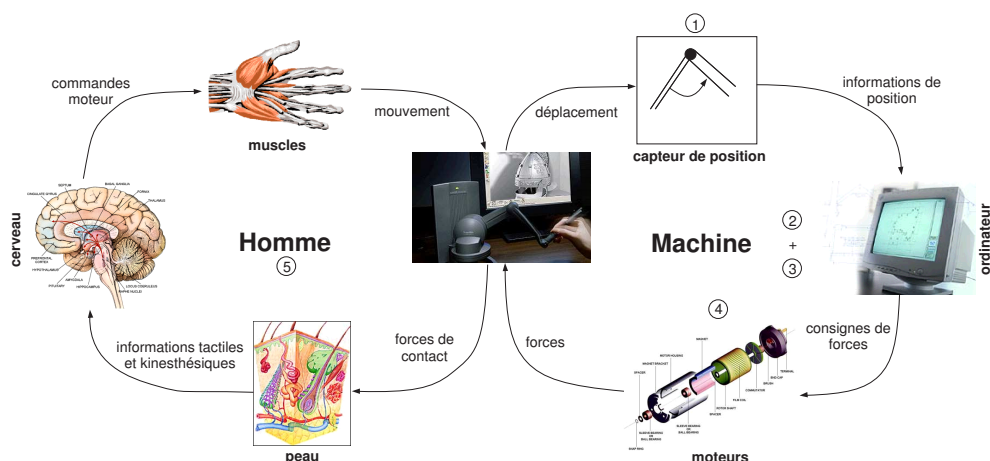


FIG. 3 – Schéma d'architecture de rendu haptique - interaction entre l'homme et la machine.

Dans l'exemple présenté sur la figure 3, les moteurs contrôlent la force appliquée en fonction des positions du périphérique. On parle dans ce cas de **contrôle en impédance**. Il est également possible de mesurer une force ou un couple et de contrôler le déplacement de l'interface par le biais des moteurs. Dans ce cas, on parle de **contrôle en admittance**. Le contrôle en impédance, plus simple à mettre en œuvre, est utilisé dans la majorité des périphériques à retour de force. C'est le cas du Phantom. Ce type de contrôle est mieux adapté à la simulation de raideurs faibles à modérées (pour des raisons de stabilité). Le contrôle en admittance est, quant à lui, mieux adapté à la simulation de raideurs importantes (toujours pour des raisons de stabilité) et a également l'avantage de masquer des défauts de la mécanique comme les frottements. Il est par exemple utilisé pour le HapticMaster

3.2 Considérations fréquentielles

Le schéma précédent se doit d'être exécuté à une fréquence compatible avec le phénomène simulé. Pour un geste humain, main libre, 1KHz semble être une fréquence couramment admise pour obtenir une interaction stable en temps réel². On pourra tolérer une fréquence moindre si-tôt que la main n'est plus contrainte. Cette valeur est à comparer aux seuls 25Hz nécessaires à une bonne restitution d'une image animée.

Une question divise encore les chercheurs. Faut-il ou non faire tourner l'environnement virtuel à la même fréquence ? Les avis divergent. D'une part, il est très coûteux de faire tourner l'environnement virtuel à une telle fréquence. D'autre part, si l'environnement virtuel est calculé moins vite, il faut trouver des moyens pour pouvoir tout de même mettre à jour la boucle de commande, soit par extrapolation (anticipation), soit par simulation d'un plus petit modèle, plus rapide à calculer.

²Une définition du temps réel pourrait être : " Un système est dit temps réel lorsque l'information après acquisition et traitement reste encore pertinente ". Ce qui signifie que dans le cas d'une information arrivant de façon régulière (sous forme d'une interruption périodique du système), les temps d'acquisition et de traitement doivent rester inférieurs au temps de rafraichissement de cette information.

3.3 Modélisation et simulation de l'environnement virtuel

L'environnement virtuel ne se contente pas de fournir des images et du son, mais également des forces. Il faut donc que les objets simulés soient caractérisés par des propriétés mécaniques.

Les diverses forces à mettre en œuvre sont par exemple :

- la gravitation
- la pression
- les frottements secs et visqueux
- les collisions . . .

Il ne faut pas croire qu'il suffit de mesurer les caractéristiques physiques réelles et de les reporter dans le modèle. Un mur (ou tout objet rigide en général) est impossible à simuler correctement avec les interfaces haptiques actuelles. La plupart du temps, on le simule à l'aide d'un ressort très puissant : l'objet manipulé à l'écran reste à la frontière du mur alors que l'on continue de mesurer sa pénétration dans le mur ; la force envoyée à l'interface est proportionnelle à la distance de pénétration (loi de Hooke : $F = k x$). De plus, il n'existe en physique aucun modèle générique et complet permettant de simuler des corps qui se déforment.

La modélisation est à faire une fois pour toutes préalablement. Durant la phase d'utilisation du périphérique, il s'agit de calculer le comportement des objets du système. Cela passe par la résolution des équations physiques. Si possible, on essaie de recourir à des modèles (très) simplifiés afin d'accélérer le calcul. Par exemple, pour simuler un bouton, la fonction utilisée correspond dès le contact à un ressort de raideur moyenne, suivi lorsque le déplacement augmente par une phase de force presque nulle correspondant à l'enfoncement du bouton et au frottement, puis suivi par une phase où la raideur devient très importante (bouton complètement enfoncé). C'est le "click haptique".

La difficulté essentielle de la simulation est de devoir calculer une action durant au maximum le temps que met l'action à s'exécuter. Si la simulation s'exécute à une fréquence de 1Khz, cela signifie que l'état du système à chaque ms est déterminé toutes les ms. On a alors seulement 1ms pour calculer le comportement de l'environnement à partir de l'instant précédent. En d'autres termes, il faut que l'horloge interne de la simulation soit calibrée sur l'horloge du monde réel.

Même si le modèle physique est simple, il va falloir au moins détecter les contacts avec les corps simulés, car c'est là que le retour haptique doit s'exercer. Cette étape s'appelle la détection de collision, et elle est responsable de 90% du temps de calcul. Des bibliothèques génériques commencent à exister (I-Collid et H-Collide de l'UNC de Chapel-Hill, Enhanced GJK de Oxford University). Des moteurs physiques voient le jour : Vortex, Havok, NovodeX, Solid, Swift++.

3.4 La boucle de contrôle

3.4.1 La stabilité

Il est très délicat de simuler un mur virtuel : il sert de plate-forme de test idéale pour mesurer la robustesse et la stabilité d'un dispositif à retour haptique. Voyons pourquoi :

Supposons que l'utilisateur entre en contact avec un mur virtuel. Avant le contact, il ne ressent rien. Après le contact, en raison de la fréquence de simulation, l'utilisateur a touché la surface mais a sûrement déjà pénétré dans le mur. Le simulateur calcule alors une force très importante, renvoyée par le ressort modélisant le mur. Cette force fait reculer l'utilisateur et l'éloigne du mur. Cependant, au pas suivant, il n'y a plus contact et donc aucune force n'est renvoyée à l'utilisateur. L'utilisateur continuant son mouvement pénètre à nouveau dans le mur car plus aucune force ne l'en empêche d'où une force importante qui est retournée et ainsi de suite. Ce problème aboutit à des oscillations haute fréquence que la main de l'utilisateur subit : l'utilisateur n'a pas d'autre choix que de s'écarter complètement du mur... ou de tout lâcher !

Cette instabilité est classique et peut se résoudre en ajoutant un amortisseur au système (seulement dans le sens de la pénétration, pas s'il y a éloignement).

L'étude de la stabilité du dispositif consiste pour la boucle de commande à modifier 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.

3.4.2 La transparence

Supposons qu'un dispositif permette de simuler le poids d'un objet. L'environnement virtuel calcule ce poids ($m \times g$) et envoie cette force au dispositif. Le dispositif transmet alors cette force à l'utilisateur qui sentira non seulement cette force... mais aussi le propre poids du dispositif. L'utilisateur se rend alors compte qu'il soulève quelque chose de plus lourd que l'objet virtuel qu'il voulait saisir. Il s'agit alors de compenser cette force parasite.

La généralisation de cette technique s'appelle la transparence. Elle consiste à recenser toute les perturbations que peut amener un dispositif à retour haptique. La boucle de commande se charge alors de modifier les forces calculées, afin de compenser ces perturbations.

3.4.3 Bilan

Les cas présentés ci-dessus sont simplifiés pour la compréhension. Il ne faut pas sous-estimer ces aspects (étude des impédances mécaniques du dispositif, de l'environnement simulé ainsi que de l'opérateur). La stabilité et la transparence sont encore des sujets de recherche.

4 Réalisations

4.1 Caractéristiques des produits

Il est assez délicat de comparer deux dispositifs à retour d'effort. Il faut d'abord définir le but du dispositif : on ne fera pas la même chose avec un gant ou un joystick par exemple.

Il faut ensuite considérer le nombre de degrés de liberté de déplacement, et parmi ceux-là ceux qui fournissent du retour haptique.

La qualité de l'effort renvoyé dépend de nombreux paramètres :

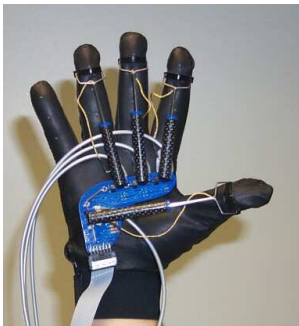
- l'architecture cinématique du périphérique
- les forces maximales en régime instantané et continu
- la raideur et les frottements ou mieux l'échelle dynamique=Force maximale/frottement
- les capteurs et actionneurs utilisés
- la bande passante du contrôle

On ne peut pas classer exactement les interfaces en interfaces à retour tactile ou d'effort car la plupart permettent de faire correctement l'un des deux, mais aussi un peu de l'autre. Lorsque l'utilisateur contrôle la position absolue du périphérique, on parle de périphérique isotonique absolu. Les périphériques à retour d'effort sont en général des périphériques isotoniques absolus.

4.2 Périphériques liés à l'utilisateur

4.2.1 Les gants

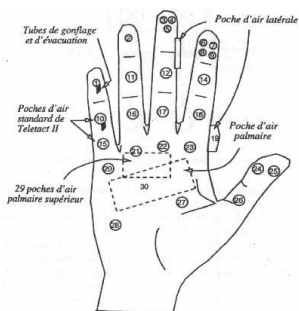
Les gants permettent une grande liberté de mouvement et la manipulation d'objets, même rigides, mais sans poids. Ces systèmes seuls ne peuvent s'opposer au déplacement de la main. Voici quelques réalisations :



Le Rutgers Master I et II : Rutgers University, en développement depuis 1992. Ils pèsent seulement 45g. L'action s'exerce grâce à des vérins pneumatiques. Les positions sont mesurées à l'aide d'un dataglove classique. L'échelle dynamique est excellente mais ces gants ne permettent cependant pas la totale fermeture du poing.



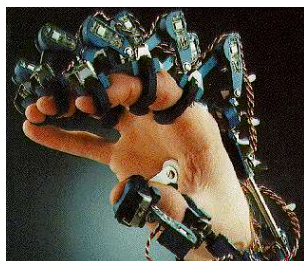
Rutgers Ankel, des mêmes concepteurs. Cet outil est dédié à la rééducation.



Les gants Teletact I et II de l'Advanced Robotics Research Ltd., et Airmuscle Ltd., à base de vingt ballonnets à air contrôlés par des vannes électro-pneumatiques. Sur le même principe, le Commander est un manche isolé, équipé de trois à cinq ballonnets. La position du manche est donnée par un polhemus (tracker à six degrés de liberté).



CyberTouch commercialisé par Virtual Technologies Corp. en 1995. Il pèse 144g. Il est basé sur six vibrateurs électromagnétiques placés derrière les doigts et dans la paume. Ils produisent des vibrations de 0 à 125Hz pour une amplitude de 1,2N.



Exos Dextrous Hand Master, conçu au début des années 1990 au MIT est à l'origine un dataglove. On lui a ajouté des bobinages audio excités à 250Hz avec des amplitudes variables afin de fournir un retour tactile.



Cybergrasp Glove 1998 par Virtual Technologies, à Palo Alto. C'est le seul gant haptique qui soit actuellement commercialisé. La motorisation est déportée, et la transmission se fait par câble à partir du dos de la main. Ceci induit beaucoup de frottements et par conséquent une moins bonne échelle dynamique. Ce périphérique est relativement lourd (450g).



Les gants peuvent être couplés à un bras à retour d'effort trois degrés de liberté actifs pour compenser le poids du gant tout en laissant la possibilité à l'utilisateur de ressentir le poids des objets manipulés et les forces de contacts avec l'environnement. C'est le cas du CyberForce commercialisé par la société Immersion qui est utilisé en combinaison avec le CyberGrasp.

4.2.2 Les exosquelettes



FIG. 4 – **a.** Ce système de Southern Methodist University contrôle complètement l'épaule et le coude de l'utilisateur par des vérins pneumatiques. **b.** Sarcos Dextrous Arm Master, à base d'effecteurs hydrauliques a été proposé par Sarcos INC., en collaboration de l'université d'Utah et le Naval Ocean Systems Center. **c.** Le Safire, proposé par Exos Inc., possède huit degrés de liberté (trois pour le pouce, trois pour l'index et deux pour le majeur). Il est basé sur des câbles et des moteurs à courant continu. Il pèse 2,5Kg !

4.3 Les périphériques non-liés à l'utilisateur

4.3.1 Les périphériques de bureau

- Les bras :

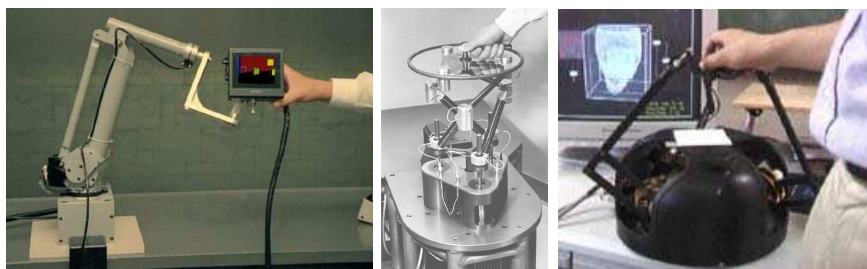
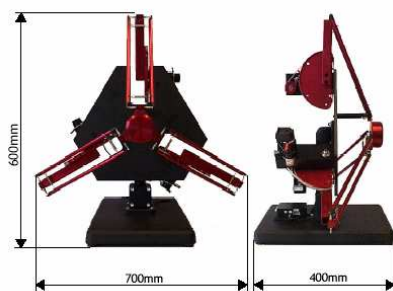


FIG. 5 – **a.** Le Palmtop est un écran LCD monté sur un bras articulé motorisé (moteurs ultrasoniques) permettant à la fois d'observer mais aussi de saisir un objet rigide. **b.** De l'université NorthWestern, ce périphérique possède quatre degrés de liberté. **c.** Le HapticMaster de l'université de Tsukuba au Japon avec six degrés de liberté. Il est basé sur des moteurs à courant continu.

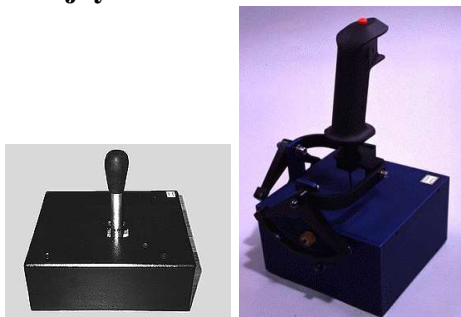


Les Maglev 1 et 2 sont des périphériques basés sur les forces magnétiques de Lorentz. La version 2 possède six degrés de liberté et sert plutôt au retour tactile.



La plate-forme delta est un périphérique 6 degrés de liberté basé sur une architecture de robot parallèle. Il est commercialisé par la société suisse Force Dimension sous deux versions à 3 et 6 degrés de liberté actifs.

- Les joysticks :



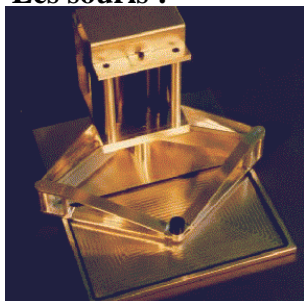
Impulse Stick et Impulse Engine par Immersion Corp. Ces joysticks sont très précis et réservés à des usages professionnels (téléopération).

Depuis quelques années, il y a une explosion de l'offre en joysticks grand public à retour d'effort :



FIG. 6 – a. Microsoft SideWinder Force Feedback Pro. b. CH Products FORCE FX. c. Logitech Wingman Force

- Les souris :



Sorte de souris à positionnement absolu, le Pantographe comporte très peu de frottements, une faible inertie et une grande rigidité. Elle a été inventée à l'université McGill.



Feel-it Mouse, basée sur un mécanisme pantographe et développée par Immersion Corp. Ce périphérique permet de simuler des états de surface d'un plan 2D. Son débattement est de 2,5 sur 1,9 cm. Elle permet par exemple de fournir du relief à un gestionnaire de fenêtres.



Le PenCat/Pro d'Immersion permet de renvoyer à l'utilisateur un retour d'effort à l'extrémité du stylo suivant deux degrés de liberté.

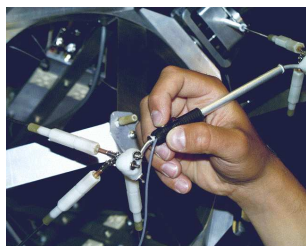
• Les volants :

Dans le marché du jeu, le retour d'effort appliqué au volant a connu un succès très rapide, et de nombreux constructeurs de périphériques proposent au moins un modèle dans leur catalogue. Le marché étant grand public, on ne cherche pas à atteindre des couples trop importants. En voici un exemple sur le marché :



FIG. 7 – Microsoft SideWinder Force Feedback Wheel

4.3.2 Les périphériques stylo



D'autres dispositifs s'appuient sur une interface de type " stylo ". Tel ce périphérique réalisé par l'université du Colorado pour des applications de visualisation scientifique. Il dispose de cinq degrés de liberté, pilotés par des moteurs. Il est possible d'incorporer un sixième degré de liberté (rotation axiale du stylo).



Produit depuis 1994 par SensAble Technologies à Boston, le PHANTOM Premium existe en 3 exemplaires, dépendant du débattement voulu. Il est équipé de six degrés de liberté, dont trois seulement (les trois translations) sont motorisées. De force maximale de 22N mais seulement 3N en régime soutenu. Cette force maximale diminue avec le débattement.



Le dernier né de chez Sensable, le Phantom Omni, destiné à un public plus large (environ 1500 euros).

L'inconvénient majeur du PHANTOM est de ne pas proposer de retour d'effort en rotation. Par contre, il permet également de fournir un retour tactile en appliquant des vibrations sur les axes. Il faut alors deux PHANTOM pour pouvoir obtenir des efforts sur les six degrés de liberté d'un objet rigide libre de contraintes. Il est surtout employé pour simuler un stylo ou un doigt virtuel. Il est fourni avec une API, la bibliothèque GHOST.



Une version améliorée du plus grand PHANTOM a été réalisée et propose un effort sur les 6 degrés de liberté.



Le Virtuoso 3D propose un retour d'effort sur les 6 degrés de liberté. Il a été développé au CEA. La société Haption commercialise le dispositif.



Le HapticMASTER est un périphérique à trois degrés de liberté motorisés commercialisé par la société FCS-Control Systems. Son originalité est de posséder deux degrés de liberté linéaires.

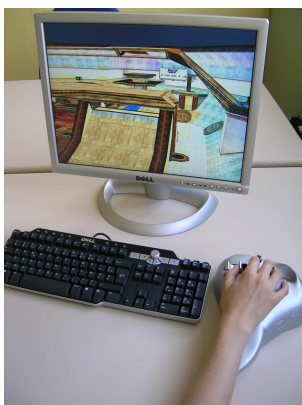


La société MPB Technologies propose une alternative au PHANTOM, le Freedom S6. Ce système dispose de six degrés de liberté et semble employer une technologie similaire au PHANTOM.

Et aussi...

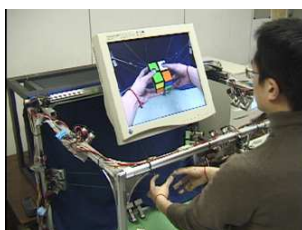


L'ACROE de Grenoble a proposé un clavier rétroactif modulaire. C'est une approche originale qui consiste à construire un dispositif de "moteurs en tranche", chacun prenant en charge un degré de liberté (88 au maximum). Ensuite, il faut réaliser des liaisons mécaniques (sans jeu ni frottement) permettant d'exploiter ces degrés de liberté.



Le DigiHaptic a été conçu au LIFL-L2EP de Lille. Ce périphérique propose trois degrés de liberté séparés à retour d'effort ; manipulables du bout des doigts avec le pouce, l'index et l'annulaire. Chaque doigt contrôle un degré de liberté de l'objet manipulé à l'écran. Les trois degrés de liberté sont associés de façon à rendre intuitif leur utilisation : le mouvement de chaque doigt correspond au mouvement de l'objet à l'écran. Ce périphérique peut être utilisé pour la manipulation fine d'objets 3D ou la navigation en environnements 3D.

4.3.3 Dispositif à câbles



Le laboratoire Sato-Koike au Japon a développé un périphérique à câbles appelé SPIDAR. Chaque câble est motorisé et permet d'exercer un retour d'effort dans une direction.

4.4 Les interfaces tactiles



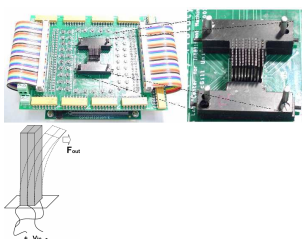
La iFeel mouse de Logitech. Cette souris possède un vibreur capable de renvoyer des informations quand l'utilisateur passe sur les différents éléments du bureau. Elle est aussi utilisable dans les jeux.



Ce dispositif a été proposé par le Forschungszentrum de Karlsruhe, il est basé sur le principe des afficheurs Braille.



Le FEELEX2 de l'université de Tsukuba au Japon propose à l'utilisateur de ressentir des surfaces. Il est basé sur des moteurs linéaires.



Le STReSS de l'université McGill au Canada est un dispositif tactile basé sur des céramiques piézoélectrique. Sa résolution spatiale est de 1mm pour une fréquence maximum de 700Hz.

4.5 Les instruments médicaux



Immersion Corp. commercialise depuis le milieu des années 1990 des systèmes de pinces coeliocopiques. Un dispositif simulant l'insertion d'une seringue a également été proposé, mais sans véritable retour d'effort (seul un frein empêchait le mouvement).

L'université de McGill propose une version du freedomS6 permettant d'y adapter des instruments chirurgicaux.

5 Conclusion

De tous les périphériques précédemment présentés, peu sont actuellement commercialisés. On peut citer essentiellement Immersion Corp pour ses pinces, SensAble pour le PHANTOM et Virtual Technologies pour le Cybergrasp. De gros problèmes sont encore à résoudre : encombrement et poids du dispositif, forces maximales retournées, stabilité et transparence du dispositif,

calcul des forces au niveau logiciel, communication temps-réel (est-il possible de commander un système à retour haptique distant en passant par IP ?)... Cependant, le retour haptique a fait ces dernières années une entrée remarquée dans le grand public avec les joysticks et les volants. De plus, des logiciels classiques de CAO commencent à supporter le PHANTOM. Dans l'avenir le retour tactile devrait se généraliser grâce à l'emploi de moteurs miniatures disposés tout autour de la zone à stimuler.

6 Pour en savoir plus...

<http://www.sensable.com> Entreprise commercialisant le PHANTOM
<http://www.reachin.se> Société spécialisée dans le soft pour le retour d'effort
<http://www.forcedimension.com> Entreprise commercialisant le Delta Force Feedback
http://www.haption.com/v3/eng/products_fr.htm Virtuoso 3D et 6D
<http://www.immersion.com> Entreprise leader sur le marché du retour d'effort
<http://lims.mech.northwestern.edu/projects/> Haptic displays
<http://www.msl.rh.cmu.edu/projects/haptic/> Interfaces haptiques à lévitation magnétique
http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/vrlab_web/index_e.html Le Haptic Master (Japonais)
<http://www-acroe.imag.fr/sommaire.html> ACROE
<http://www.fcs-cs.com/robotics/> HapticMASTER (Hollandais)