

Les interfaces tactiles et leurs applications

L'étude de la réalité virtuelle a récemment fortement augmenté de par ces applications en robotique, télémanipulation, jeux vidéo et une foule d'autres domaines. A titre d'exemple, les chirurgiens en cardiologie aux États-Unis ne peuvent plus s'entraîner sur des animaux comme auparavant mais doivent pourtant s'entraîner avant d'opérer des personnes. Regarder opérer un chirurgien confirmé ou visionner une vidéo d'opération sur un écran n'est pas suffisant car ces types d'expériences d'entraînement visuel n'apprendront pas au futur chirurgien quelle pression exercer en manipulant un scalpel. La contribution du toucher virtuel joue alors un rôle significatif. Dans ce cadre, les feedbacks de force d'un dispositif de toucher virtuel peuvent apporter un gain humain important en aidant les professionnels de médecine à acquérir de nouvelles compétences.

La recherche dans ce domaine s'est appuyée sur la convergence de spécialistes de plusieurs disciplines scientifiques. Les psychologues y sont impliqués, avec des ingénieurs, des programmeurs en informatique et souvent des spécialistes en robotique. Les progrès dans ce domaine ont été rapides, mais il est probable que nous en apprendrons beaucoup plus dans les prochaines années.

Les interfaces tactiles sont des dispositifs permettant à l'utilisateur d'interagir avec son environnement via le toucher. Ces dispositifs agissent sur l'utilisateur en appliquant des forces, des vibrations ou des mouvements, permettant à quelqu'un de sentir des températures, des textures, des formes, des viscosités ou des forces. Pour stimuler la sensation des organes lorsqu'ils sont manipulés, il est nécessaire d'avoir une communication à double sens entre l'utilisateur et l'ordinateur rendue possible par une interface tactile. Au contraire de la vision et de l'audition, le toucher est un sens qui permet ce transfert bidirectionnel d'information

entre l'utilisateur et un environnement virtuel (Biggs & Srinivasan, 2002). Regarder une surface (par ex. un visage) ne la modifie pas, mais la touche le peut.

Les interfaces tactiles ont plusieurs caractéristiques spécifiques. Une première caractéristique concerne l'actualisation des informations en fréquence et en temps réel. Par exemple, lorsque l'utilisateur manipule l'outil (stylo, joystick, etc.) d'un dispositif haptique, la nouvelle position et l'orientation de l'outil haptique sont acquises et les contacts avec l'objet virtuel sont détectés. Si un contact est détecté, les forces interactives sont calculées en utilisant les règles préprogrammées pour une réponse de collision. Puis ceci est transmis à l'utilisateur à travers le dispositif haptique pour lui fournir une représentation tactile des objets en 3D et de leurs détails de surface. Par conséquent, il faut une boucle qui actualise les forces à environ 1kHz car autrement, les surfaces virtuelles semblent plus molles ou, au pire, au lieu de sentir une surface, il semble que le dispositif haptique vibre (Brooks, 1990). Ces deux composantes, détection de contact et réponse de collision, définissent généralement un algorithme de rendu haptique (Basdogan & Srinivasan, 2002). En d'autres mots, le calcul de l'algorithme de contact/collision, les stimulations physiques des propriétés tactiles des objets virtuels et la transmission de forces (ou positions) vers les interfaces doivent être réalisés en moins d'une milliseconde. Malgré la puissance croissante des ordinateurs actuels, ces calculs devraient être optimisés et une simplification du monde virtuel est souvent nécessaire. Pour comparaison, la manipulation d'une scène visuelle impliquant une représentation informatique du monde virtuel nécessite, au minimum, une fréquence de rafraîchissement de l'ordre de 30Hz.

En outre, les mécanismes de synchronisation entre les scènes visuelle et tactile impliquent un processus d'exclusion mutuelle (« mutex »). Ces mécanismes peuvent aussi être mis en jeu pendant l'existence de différents canaux sensoriels, kinesthésiques et tactiles, où les besoins en termes de fréquence d'émission d'information ne sont pas les mêmes.

L'interaction en temps réel est efficace lorsque les sujets ne perçoivent pas d'écart entre leur action motrice dans l'environnement virtuel et la réponse sensorielle de ce dernier. À son tour, le degré d'immersion dépend de la manière dont les expériences perceptuelles du sujet sont nourries par l'information du monde virtuel. L'immersion est une expérience dans laquelle le monde virtuel est senti pour être réaliste et l'on perçoit comme si l'on était « dans ce monde », sans conscience de soi.

Une deuxième caractéristique spécifique des interfaces tactiles concerne la nature, la position, et la taille de l'espace de travail. L'espace de travail des interfaces tactiles est souvent réduit à l'accomplissement d'un geste simple. Les interfaces à base fixe ou mobile sont des tentatives pour répondre aux nombreux problèmes impliquant la vitesse de transmission d'informations destinées au dispositif tactile, le contrôle du robot porteur ou pour traiter des forces de résistance. L'espace de travail est donc un facteur limitant dans l'accomplissement d'un geste écologiquement valable, c'est-à-dire un geste qui est naturel et représentatif des expériences sensorielles de la vie réelle. De même, une différence de position ou d'échelle entre l'espace de visualisation et l'espace de manipulation induit une dégradation de l'immersion. Lorsque nous déplaçons la souris de l'ordinateur sur le côté du bureau pour déplacer le curseur à l'écran en est un exemple évident. Inversement, une expérience d'espace co-localisé spatialement implique les mêmes zones de visualisation et de représentation. Ceci peut améliorer de manière significative l'expérience d'immersion de l'utilisateur. Cependant, certains conflits sensoriels peuvent survenir, dans la mesure où l'homme est placé dans des conditions inhabituelles ou face à des demandes incohérentes ou incompatibles. Ces conflits sont principalement utilisés dans les sciences cognitives pour déterminer les mécanismes cognitifs et cérébraux impliqués dans l'intégration intermodale (chapitre 5).

Enfin, en regardant des « interfaces manipulables » (Tableau 11.1), le réalisme du rendu haptique est souvent associé avec le nombre de degrés de liberté (DL) du dispositif. La

main humaine dispose de 22DL, mais peu de dispositifs haptiques en offrent. Il y a une différence entre le DL et les degrés d'action. Les dispositifs haptiques les plus communs sont sous forme de bras articulés, où l'utilisateur tient l'une des extrémités, généralement un stylo, qui peut être contrôlé avec 6DL ; translations en X, Y et Z et rotations autour de ces mêmes axes. Ces dispositifs permettent ainsi de transmettre des forces et par conséquent contraignent les actions de l'utilisateur sur tout ou une partie de ces axes. C'est ce que l'on appelle les « niveaux d'action ». Par conséquent, un dispositif peut permettre une manipulation en 6DL et n'avoir que trois degrés d'action. Par exemple, pour la représentation fidèle de la tâche d'écriture, nous devons savoir la position tridimensionnelle de la pointe du stylo mais aussi son inclinaison. Cependant, il est nécessaire de forcer cette inclinaison, à savoir la prise du stylo, car un inconfort peut en résulter pendant l'utilisation.

Taxonomie des interfaces tactiles

Après le travail précurseur de Raymond Goertz (1952), de nombreuses interfaces tactiles ont été créées. Pour tenter de mieux comprendre leurs caractéristiques, certains auteurs ont suggéré des taxonomies pour classer des interfaces tactiles. Srinivasan et Basdogan (1997) ont, les premiers, proposé une taxonomie basée sur une catégorisation entre les dispositifs avec écrans tactiles et des dispositifs kinesthésiques et entre une base indépendante (« base au sol ») et un système mobile, « basé sur le corps ». Puis, Swanson et Book (2003) ont introduit une différence dans la nature du stimulus envoyé à l'utilisateur, et, plus tard, ont fait une distinction entre les dispositifs actifs et passifs. Un dispositif actif génère des forces en utilisant diverses technologies, incluant des moteurs, des stimulateurs pneumatiques, des appareils magnétiques, etc. Un dispositif passif dissipe l'énergie du système par des mécanismes de freinage de la dissipation de l'énergie. Une troisième classification, plus

complète, des différents types d'interfaces tactiles, basée sur la technologie utilisée, est décrite par Hayward, Astley, Cruz-Hernandez, Grant, et Robles-De-La-Torre (2004). Enfin, parce que de nouveaux dispositifs sont créés, il est possible de concevoir les schémas de classification en une nouvelle taxonomie (Tableau 11.1 ; adaptée par Bluteau, 2010), basée sur deux critères principaux : le premier concerne la nature de la perception du dispositif (thermique, tactile et kinesthésique) et le second concerne la technologie utilisée pour chaque type d'expérience perceptuelle. De plus, certains dispositifs impliquent une expérience perceptuelle mite comme par exemple une perception cutanée kinesthésique. Le Tableau 11.1 présente certains exemples d'interfaces tactiles de chaque catégorie.

Tableau 11.1. Interfaces tactiles

Perception thermique

Il existe deux types principaux de technologies utilisées pour transférer une information de la chaleur à l'utilisateur. Le premier est de créer un courant de chaleur (ou de froid), puis de le « projeter » vers l'utilisateur par un ventilateur ou une soufflerie, par exemple (Ino et al., 1993). Le second utilise l'effet thermoélectrique, ou effet Peltier, découvert en 1834. En associant cette méthode avec des semi-conducteurs très performants, un module thermoélectrique ou module de Peltier a été élaboré. Le flux thermique ainsi créé nous permet de générer du froid et du chaud en un seul dispositif qui est facilement pilotable en envoyant un courant direct dans une direction ou une autre. Beaucoup de recherches sur les dispositifs de transfert de chaleur sont basés sur cette technologie (Ino et al., 1993 ; Dionisio, 1997).

Perception cutanée

Le but des interfaces tactiles pour la perception cutanée est de restituer l'information concernant la pression de surface, la vibration, la friction et la viscosité, généralement à de hautes fréquences. Il est actuellement difficile de contrôler des dispositifs mécaniques précisément à de telles fréquences. La technologie utilisée pour ce type de dispositifs dépend de l'utilisation de vibreurs ou de l'utilisation implicite de mouvements d'exploration pour assurer la précision étant donnée la capacité de discrimination du toucher. En effet, ils doivent être relativement précis étant donné qu'un adulte est capable de faire la différence entre deux points espacés de 2 mm ou moins lorsqu'ils sont positionnés sur une surface plane, avec le bout de l'index, sans aucun mouvement actif. Les mouvements actifs peuvent de plus réduire ce seuil et accroître la sensibilité. La nature des dispositifs est parfois modifiée (par ex. par l'utilisation d'une stimulation électrique précise) et la taille des stimulateurs est souvent réduite. Enfin, les deux dernières catégories font partie de telles interfaces tactiles : les dispositifs tangibles, utilisant des objets réels comme vecteurs de sensations et des dispositifs exploitant les illusions perceptuelles du toucher.

1- Dispositifs vibro-tactiles : les dispositifs visuo-tactiles sont utilisés pour stimuler les récepteurs de la surface de la peau avec des vibrations. L'utilisation de micromoteurs ayant des poids décentrés peut reproduire ces sensations. Ils peuvent être placés sur différentes zones de la personne, comme un gant vibreur (CyberGlove, 2009), une ceinture vibrante (Bluteau, Coquillard, Gentaz, & Payan, 2010) ou sur des objets manipulés par la personne comme un téléphone portable ou un stylo (Lee, Dietz, Leigh ; Yerazunis, & Hudson, 2004). La matrice à aiguilles de l'Optacon est quant à elle utilisée pour convertir du texte en Braille (Convertisseur d'optique en tactile –Figure 11.1A ; Goldish & Taylor, 1974). L'Optacon peut

cependant peut-être être considéré comme un dispositif hybride car il comporte une caméra connectée à un ordinateur et à un afficheur tangible vibrant. Lorsque la caméra balaie une lettre, un affichage dynamique d'aiguilles vibrantes est reproduit sur l'afficheur de l'Optacon. Ces aiguilles vibrantes constituent une représentation analogique des formes des lettres. Généralement, la stimulation prend la forme d'un affichage dynamique qui est équivalent à une illumination de « Times Square », car la stimulation est séquentielle.

2-Dispositifs électro-tactiles : les dispositifs électro-tactiles stimulent directement la surface du corps ou des organes par l'application de courants électriques faibles. Ces ensembles d'électrodes sont placés sur l'estomac pour l'une des versions du TVSS ; Figure 11.1B ; Bach-y-Rita, 1972) ou sur la langue (Figure 11.1C pour Tongue Display Unit-TDU ; Bach-y-Rita et al., 1998 ; Robineau, Boy, Orliaguet, Demongeot & Payan, 2007). Ce sont des exemples bien connus de ce type de dispositifs.

3-Dispositifs de surfaces déformables : le défi de stimuler les propriétés de surface d'un objet conduit à concevoir des dispositifs spécifiques comme des ensembles d'aiguilles pour adapter la forme d'un objet à « sentir » (Shimoyo, Shinohara, & Fukui, 1997). D'autres mécanismes tentent d'imiter la surface d'un objet en déformant une surface pour stimuler un objet (Figure 11.1D) ou une partie de cet objet (Bordegoni, Cugini, Covarrubias, & Antolini, 2009 ; Iwata, Yano, Nakaizumi, & Kawamura, 2001).

Figure 11.1A. OPTACON : matrice d'aiguilles utilisée pour convertir un texte en Braille (Optical to Tactile CONverter (Goldish & Taylor, 1974).

4-Dispositifs tangibles : les dispositifs tangibles utilisant des objets tangibles (ou des accessoires) ont été introduits par Hincley, Paush, Goble, et Kassell (1994). Ces objets sont réels, non contrôlés par un ordinateur, mais ils fournissent des informations sur la structure de surface, la rigidité et l'élasticité liées à leurs structures physiques. La forme et la texture de l'objet permet à l'utilisateur d'agir intuitivement sur un objet virtuel en manipulant l'objet tangible qui lui est associé. Ce concept a été étendu aux objets virtuels en combinant certaines propriétés physiques réelles et des éléments virtuels, comme dans le « mixed-prop » (Ortega, 2007).

5-Hologrammes tactiles : un hologramme est une image tridimensionnelle paraissant « suspendue dans l'air ». Un « hologramme tactile » serait une représentation d'un objet virtuel suspendue en l'air, sans aucun contact tactile réel. Des études montrent qu'il est possible de simuler des objets virtuels sans réel contact en se servant de techniques de projection utilisant l'air (Suzuki & Kabayashi, 2005) ou des ultrasons (Iwamoto, Tatzono, & Shinoda, 2008).

Perception kinesthésique

Les interfaces tactiles pour une perception kinesthésique peuvent être classées selon quatre types de technologies : 1. Des exosquelettes (fixes ou portables) ; 2. Des interfaces tactiles peuvent être manipulées et le sujet sentira les forces appliquées par un mécanisme de préhension ou de fixation directe ; 3. Des dispositifs isométriques et 4. Des robots porteurs, mobiles ou fixes.

Figure 11.1B : Photo du Pr Bach-y-Rita équipé d'un ensemble d'électrodes placées sur l'estomac pour le Tactile Vision Substitution System (TVSS) (Bach-y-Rita, 1972).

1.Exosquelettes : historiquement, ces dispositifs sont apparus en premier et peuvent être regardés comme les fils de la manipulation à distance. On peut distinguer les dispositifs fixes et les portatifs. Ces derniers sont généralement fixés à un bureau, au sol, au mur, ou au plafond d'une pièce ou sur l'utilisateur. Leur design et leur taille sont fonction de la taille maximum et des besoins potentiels des utilisateurs. Leur taille est généralement grande et les dispositifs robustes. Leurs prix varient avec leurs tailles et leur ample espace de travail. Parmi les exosquelettes fixes, le bras avec une liberté de 7° de Nakai, Ohashi et Hashimoto (1998) est un bon exemple (Figure 11.2A). Certains dispositifs sont portatifs et comme le suggèrent leurs noms et sont portés sur les humains. Le gant de retour de force, CyberGrasp (CyberGlove, 2009) en est un exemple (Figure 11.2B)

Figure 11.1C : Tongue Display Unit (TDU) : un sujet équipé d'un ensemble d'électrodes placées sur la langue (Robineau, Boy, Orliaguet, Demongeot & Payan, 2007).

2.Interfaces haptiques : il existe plusieurs interfaces haptiques dans lesquelles la technologie utilisée peut être très différente, mais leur aspect commun est l'utilisation d'un outil (stylo, manettes, instruments de chirurgie,...) que l'utilisateur manipule pour interagir avec l'environnement. Iwata (2008) a suggéré le concept de « Tool Handling Devices » [Dispositifs de manipulation d'outils] alors que d'autres auteurs utilisent le terme de « Desktop Haptic Devices » [Dispositifs haptiques de bureau]. Quel que soit l'appellation, ces

interfaces haptiques peuvent être classées par leur nombre de Degré de Liberté (Laycock & Day, 2003). Pour éviter une liste sans fin (dispositifs DL1, DL2 ; DL3...), seuls les dispositifs avec deux ou trois (ou plus) DL sont présentés ici. Par ailleurs, les dispositifs modulaires sont aussi considérés ici comme une sous-famille.

Il existe quelques interfaces avec 2DL, dues à une modification des dispositifs d'inputs. Le nombre de souris a été augmenté (Akamatsu & Sato, 1994 ; Ishii, Tang, Hasegawa, & Sato, 2009), les manettes peuvent être utilisées (Adelstein & Rosen, 1992), les volants de retour de force sont une option (producteur Logitech), avec d'autres utilisant des contrôleurs rotatifs (Badescu, Wampler, & Mavroidis, 2002) et des boules de commande (Engel, Goossens, & Haakma, 1994). Une autre caractéristique de ces interfaces avec 2DL est la simulation d'une tâche très spécifique comme dans le dispositif au grand pouvoir de Ellis, Ismaeil, et Lipsett (1996) ou le Pantographe (Figure 11.3) pour simuler l'exploration d'une surface avec un index (Ramstein & Hayward, 1994).

Figure 11.1D : FeelFlex : simulation d'une surface par déformation (Iwata et al., 2001).

Figure 11.2A : un exemple d'exosquelettes avec un base fixe et un bras avec 7 DL (Nakai et al., 1998).

Figure 11.2B : un exemple d'exosquelette portatif : le CyberGrasp (CyberGlove, 2009).

Les interfaces haptiques avec 3DL (ou plus) sont très nombreuses. Les technologies utilisées sont mécaniques (Salisbury, Brock, Massie, Swarup, & Zilles, 1995), pneumatiques

ou hydrauliques (Burdea, Zhuang, Roskos, Silver, & Langrana, 1992), magnétiques (Berkelman, Hollis, & Salcudean, 1995), ou basées sur des câbles (Sato, Hirata, & Kawarada, 1992). L'avantage particulier de ces interfaces est leur capacité de simuler le toucher dans un nombre relatif de domaines, incluant la chirurgie fine, l'écriture, les modèles en 3D, les jeux, etc., tout en restant accessibles en taille et en prix.

Enfin, une autre classe modulaire de dispositif permet de « construire » un dispositif sur mesure avec la possibilité d'un grand nombre de DL. C'est le cas du clavier rétroactif modulaire (Cadoz, Lisowski, & Florens, 1990). Il est composé de touches similaires à celles d'un piano, dont la hauteur est contrôlée par ordinateur. Chaque touche est contrôlée de manière magnétique. Un clavier est donc une composition de ces touches, sur lesquelles il est possible de connecter de multiples dispositifs à une ou davantage de touches. Ce projet, initialement destiné à la création musicale, peut offrir une multitude de configurations de feedbacks possibles. Ceci inclut des joysticks à 3DL ou 6L, des feedbacks de ciseaux de force, d'anneaux, etc.

3-Dispositifs isométriques : les dispositifs isométriques peuvent rejoindre la catégorie précédente d'interfaces haptiques car ils partagent le concept de manipulation. Néanmoins, leur mode opératoire est très différent. Dans le cas des dispositifs que l'on manipule, les actionneurs mesurent la position et retournent une force à l'utilisateur. Dans le cas de dispositifs isométriques, une force est mesurée et une position est retournée à l'utilisateur. Dans le premier cas, le contrôle est appelé isotonique et implique une force sans changement de position. Dans le second, le mécanisme de contrôle est appelé isométrique et la position ne change pas indépendamment de la force exercée. La terminologie fréquente utilisée ici est celle d'une commande d'impédance pour les dispositifs isotoniques et d'un contrôle

d'admission utilisé pour les dispositifs isométriques. Il existe très peu de ces dispositifs en raison de la très grande complexité du contrôle, y compris l'utilisation de capteurs de force. Le HapticMaster (Van der Linde, Lammertse, Frederiksen, & Ruiten, 2002) de la société FCS Control System en est un bon exemple. FCS Control System, scission de la Fokker Aircraft Company, est née à la fin des années 70 en appliquant l'expertise de la Fokker Aircraft dans les difficiles systèmes de contrôle basés au sol.

Figure 11.3 : un dispositif pour simuler l'exploration d'une surface avec un index, le Pantographe (Ramstein & Hayward, 1994).

4- Robots porteurs de base fixe et de base mobile : les robots porteurs de base fixe ou mobile, offrent une extension de l'espace de travail des dispositifs haptiques conventionnels. Ils utilisent un dispositif haptique combiné avec un appareillage de transport (transporteur) dépendant des positions de l'utilisateur. Au contraire des dispositifs qui sont à base fixe ou portable, ces dispositifs sont équipés de capteurs fournissant des informations sur la position de l'utilisateur dans le monde virtuel. Ceci conduit à une performance plus complexe et problématique comprenant la transmission de données, le contrôle de l'appareillage du transport et la stabilité face aux forces exercées par le dispositif qui est porté. Le transporteur ne doit pas bouger pendant l'application de très grandes forces. Parmi ces dispositifs, le robot porteur des Universités de Sienne et de Stanford (Barbagli, Formaglio, Franzini, Giannitrapani, & Prattichizo, 2006) est un bon exemple.

Facteurs multimodaux dans le toucher virtuel

Beaucoup des recherches concernant les dispositifs de toucher virtuel n'ont pas contrôlé l'effet de la vision sur le toucher virtuel mais ont tenté d'augmenter l'expérience visuelle avec le toucher. Dans ces circonstances, les participants regardent une représentation informatique d'un objet pendant qu'ils sentent un objet virtuel avec un dispositif de retour de force. Bien sûr, ceci est écologiquement valide et similaire aux expériences perceptuelles normales où l'on peut obtenir des informations sur un objet à travers de nombreux sens. Ainsi, dans le monde réel, nous pouvons simultanément percevoir un objet, le voir, et entendre les sons qu'il produit si nous manipulons l'objet. Cette analyse vaut aussi pour la recherche sur le toucher virtuel. La reconnaissance d'objets utilisant un dispositif de retour de force comme le dispositif Omega ou le contrôleur de jeu Falcon, n'est généralement pas opérée sans la vue, sauf dans les rares cas d'études impliquant des personnes déficientes visuelles sévères.

Heller, Mertz, Walk, et Schnarr (2008) examinent les performances en utilisant un dispositif de toucher virtuel Falcon avec retour de force. Dans une étude préliminaire de faisabilité, les 10 sujets voyants les yeux bandés ne perçoivent aucune des sept formes virtuelles à chaque essai. Les sept formes virtuelles sont présentées trois fois chacune dans trois blocs d'essais dans un ordre aléatoire et comprenaient une ellipse, un rectangle, un croissant de lune, un losange, un triangle, un hexagone et un cœur. Les formes virtuelles sont fonctionnellement équivalentes à des solides ressortant sur un arrière fond frontal. L'expérience de toucher virtuel permet aux sujets de sentir l'extérieur des formes et leur surface frontale. Il leur est demandé d'identifier la forme virtuelle qu'ils perçoivent avec la main droite en la comparant avec un ensemble de choix multiples réalisé sur papier thermo-gonflable qu'ils percevaient avec la main gauche. Les performances des sujets sont proches de la perfection avec une moyenne de 20,3 bonnes réponses sur 21 possibles. Les performances dans cette tâche sont cependant extrêmement variables. Certains sujets trouvent cela facile

tandis que d'autres ont des difficultés à faire la distinction entre les frontières de l'objet virtuel et les bords de l'espace de travail virtuel. Dans le Falcon, l'espace de travail virtuel est seulement de 10x10x10cm.

Une deuxième expérience compare les performances haptiques, comme dans la description faite dans le paragraphe précédent, avec la vue d'un « acteur » percevant les objets virtuels. Dans cette expérience, 32 sujets expérimentalement naïfs sont testés par paires. Une personne les yeux bandés perçoit les objets virtuels, comme dans le pilote de l'étude préliminaire mentionné ci-dessus, et trouve la correspondance en percevant les formes sur le papier thermogonflable dissimulées dans une boîte. Un second sujet regarde « l'acteur » percevoir les objets virtuels et identifie les formes en regardant une image qui les représente toutes. Les sujets ayant une vue limitée indiquent leurs réponses en pointant sur les formes correspondantes. La suite des formes sont différente dans les deux ensembles, papier thermogonflable haptique et ensemble de formes visuelles à faire correspondre. Un expérimentateur se tient derrière les sujets ayant une vue limitée et enregistre leurs réponses. La moyenne de réponses correctes est plus élevée pour la vue ($M=18,9$, $SD=2,3$) que pour le toucher ($M=17,3$, $SD=3,4$). Cependant, la différence entre les moyennes n'est pas statistiquement significative.

Évidemment, on peut apprendre beaucoup en ce qui concerne les objets virtuels en regardant quelqu'un en train de les percevoir. Cela signifie qu'il est difficile de dire dans quelle mesure l'information haptique est disponible aux sujets lorsqu'ils perçoivent un objet virtuel tout en regardant sa représentation sur un écran d'ordinateur. Dans certains cas, ils peuvent obtenir une grande partie des informations sur la forme par la vue et non par le toucher. Il est à noter que cette étude n'a pas contrôlé les indices auditifs alors que les dispositifs de toucher virtuel permettent d'entendre le moteur lorsque le dispositif fonctionne. Les moteurs émettent différents sons en fonction de la texture de surface et les sons varient

aussi lorsqu'on « sent » les différentes parties d'un objet. Toutes ces composantes sensorielles possibles devraient être prises en considération dans l'évaluation des études utilisant le toucher virtuel.

Exemples de quelques applications et leur évaluation scientifique

Il y a eu des avancées impressionnantes dans le développement des interfaces tactiles. Les dispositifs sont plus sophistiqués que ceux d'autrefois qui avaient de faibles résolutions dans les années 60 et 70. Il existe des recensions détaillées de ces applications dans la littérature récente (Hayward et al., 2004) concernant 13 domaines d'activité : (1) dispositifs d'input renvoyant les forces à utiliser avec des interfaces graphiques d'utilisateur ; (2) jeux ; (3) éditions multimédia ; (4) découvertes scientifiques ; (5) arts et création ; (6) édition de sons et d'images ; (7) fonctionnement de véhicule ; (8) ingénierie ; (9) fabrication ; (10) télé-robotique et télé-fonctionnement ; (11) éducation et apprentissage ; (12) rééducation et (13) l'étude scientifique du toucher. La recherche sur les interfaces tactiles et les applications est si intense que seules quelques références ont été citées ici. Cependant, les évaluations de la contribution de ces interfaces utilisant des méthodes expérimentales rigoureuses sont, malheureusement, assez rares. Seuls deux exemples de ces applications et de leur évaluation scientifique sont présentés ci-dessous.

Guidance vibrotactile de suivi de trajectoire dans la Chirurgie Assistée par Ordinateur (CAS)

La chirurgie assistée par ordinateur (CAS) est devenue une méthode acceptée

d'assistance des chirurgiens pendant des interventions chirurgicales complexes. En fait, la CAS est souvent une méthode chirurgicale préférée dans un nombre de différentes procédures. Ces systèmes de navigation fournissent un suivi en ligne des instruments chirurgicaux ou de dispositifs auxiliaires, souvent par des caméras stéréoscopiques et des marqueurs. Les positions de suivi sont surimposées sur des scans préalablement acquis, comme des tomographies informatiques, imagerie par résonance magnétique (MRI) ou images ultrasoniques (US). L'utilisation d'images technologiques conduit à des reconstructions possibles en 3D et une planification préopératoire selon l'intervention médicale. La plupart des systèmes conventionnels en CAS informent le chirurgien sur la distance du dispositif auxiliaire relative aux structures anatomiques aussi bien qu'aux données préétablies, par exemple les aires de sécurité, les trajectoires prédéfinies etc. Cette information est habituellement fournie à travers des dispositifs de visualisation, un écran, positionné à côté du champ opératoire, à deux ou trois mètres du chirurgien. Certaines études essaient d'améliorer ce feedback visuel (1) en simplifiant le nombre d'information de guidage ou (2) en utilisant un autre canal perceptuel. Dans la première classe d'amélioration certaines applications d'injection affichent le guidage visuel en alignant des croix. Des exemples de ces procédures incluent des biopsies de reins ou des systèmes d'assistance informatique pour l'insertion de la vis pédiculaire (Mozer et al., 2005). Ces applications sont limitées à des trajectoires rectilignes.

La seconde classe d'amélioration dans l'application d'interfaces tactiles tente d'utiliser un autre canal sensoriel pour le guidage qui peut normalement être fourni par la vue ou un autre sens. Les canaux auditifs ont été utilisés de manière extensive, principalement en raison de leur efficacité temporelle. Néanmoins, leur omniprésence comme variables psychologiques limite leur utilisation pour un guidage continu en ligne. Par exemple, il n'est pas souvent possible de fournir des indices auditifs sur les directions pendant la marche si l'on

est déficient visuel. Les indices auditifs peuvent empêcher une personne aveugle de remarquer des sons dans son environnement, comme les bruits du trafic et les voitures qui s'approchent. Plus récemment, les chercheurs ont essayé d'utiliser une modalité sensorielle non encore surchargée, à savoir le canal tactile. En raison du grand nombre de capteurs sensibles de la langue, les chercheurs montrent que le guidage de procédures chirurgicales, comme des biopsies ou la frappe d'une cible anatomique peut être atteint par une stimulation électro-tactile de la langue. Ceci grâce au récent développement du Tongue Display Unit (TDU) (Robineau, Boy, Orliaguet, Demongeot, & Payan, 2007). Même si l'efficacité et l'efficacité sont montrées, un grand effort de recherche est toujours nécessaire concernant les facteurs ergonomiques et les méthodes utilisées pour réduire l'inconfort. De plus, d'autres investigations sont encore nécessaires concernant la nature des patterns de codage d'information le plus efficaces.

D'autres chercheurs se sont concentrés sur la stimulation de la peau par vibrations. Les vibreurs peuvent être placés sur face dorsale de la main (Brell, Rokamp, & Hein, 2008). Dans ce cas, Brell et al. (2008) ont développé un gant tactile doté de quatre vibreurs. Ils sont suivis par des stéréo caméras qui indiquent la position correcte de l'instrument chirurgical. Les résultats montrent une erreur de moins de 5 mm en allant vers la cible, mais il y a des problèmes de dépassement et d'oscillations pendant la tâche de suivi de la trajectoire. Les vibreurs peuvent aussi être montés sur une ceinture, portée sur l'abdomen, le torse ou l'avant-bras (Ng, Barralon, Schwarz, Dumont, & Ansermino, 2008). Ces chercheurs montrent donc que la modalité tactile conduit à un meilleur temps de réaction comparé à la stimulation auditive, mais des temps de réaction bien plus lents que ceux de la modalité visuelle.

De plus, récemment, Bluteau et al. (2010) ont examiné l'influence de la modalité vibro-tactile sur les performances humaines lors de tâches complexes, de tâches en ligne et de tâches de suivi de trajectoires non linéaires. Les auteurs ont sélectionné l'étude de la chirurgie

de la base du crâne, car c'est une procédure chirurgicale qui requiert une trajectoire complexe et un chemin pour accéder à la cible. Les auteurs proposent un paradigme de guidage tactile avec l'utilisation d'une ceinture de huit vibreurs. Deux ensembles de quatre moteurs sont placés aux points cardinaux de la ceinture de montage. La ceinture la plus haute représente la position proximale de l'instrument, près de la main du chirurgien, pendant que la ceinture la plus basse représente l'extrémité de l'instrument, la position distale. Les activations sont basées sur la différence entre la position de l'instrument et l'orientation par rapport à la trajectoire théorique optimale, en commençant à une distance de 0,02mm. La même information (lacet et tangage) était alors possible. Dans l'expérience de simulation de chirurgie de la base du crâne, les résultats trouvés auprès de participants naïfs, montrent une réduction significative des erreurs spatiales, une baisse de la vitesse moyenne et une baisse significative du besoin de feedbacks visuels, le pourcentage de temps à regarder sur l'écran de navigation en condition de guidage tactile avec ceinture, comparé à la condition de contrôle uniquement visuel. Néanmoins, il n'y a pas de différences significatives dans la durée de mouvement entre les deux conditions. Par conséquent, même après une brève période de familiarisation, la méthode de guidage tactile suggérée peut fournir efficacement des informations de localisation apportées habituellement par des systèmes de navigation, comme indiqué par la réduction du temps passé pour regarder des informations visuelles de localisation. Ces résultats sont importants pour la chirurgie de la base du crâne et de façon plus générale pour les suivis de trajectoires complexes en ligne. L'objectif principal est de réduire les erreurs de distance et de laisser le chirurgien concentrer son attention sur le champ opératoire.

Guidage haptique et apprentissage de nouvelles capacités de mouvement

Apprendre à réaliser de nouveaux mouvements se fait généralement en observant, c'est-

à-dire en suivant des démonstrations visuelles (Schmidt, 1987). Le guidage haptique par un dispositif de retour de force apporte d'autres indices proprioceptifs pendant la tâche d'apprentissage visuo-moteur. Des simulateurs virtuels, dans lesquels sont apportés des indices haptiques et visuels, semblent être une façon efficace d'enseigner des mouvements complexes (Feygin, Keehner, & Tendick, 2002 ; Liu, Cramer, & Reinkensmeyer, 2006) ; Palluel-Germain, Bara et al., 2007 ; Teo, Burdet, & Lim, 2002). Deux systèmes de guidage haptique robotique bien connus ont récemment été réalisés : le premier utilise des coordonnées spatiales (HGP), les informations de position sur la trajectoire à apprendre, alors que le second (HGF) utilise des forces générées par un enseignant pour contrôler la tâche de l'élève (Figure 11.4). Il y a toujours de nombreux débats concernant les effets des deux types de guidage, contrôle de position (HGP) ou de force (HGF), sur la poursuite visuo-manuelle, « suivis » de trajectoires.

Le guidage haptique en position (HGP) utilise principalement un contrôleur dérivé proportionnel c'est-à-dire suivant point par point la représentation visuelle de la trajectoire ciblée. Basé sur cette technologie ; Solis, Avizzano et Bergamasco (2002) ont développé un système de calligraphie japonaise utilisant une technologie de robot réactif. Malheureusement, cette étude est principalement concentrée sur les aspects techniques. Dans la même veine, Henmi et Yoshikawa (1998) ont aussi conçu un système de calligraphie japonaise utilisant une stratégie « d'enregistrement et de playback » : les auteurs enregistrent les positions et les forces appliquées par un enseignant humain et les montrent aux élèves. Cependant, dans ces deux études, aucune donnée de comportement n'est rapportée. Gillespie, O'Modhrain, et Zaretsky (1998) ont développé un enseignant virtuel basé sur un contrôleur dérivé proportionnel pour aider les élèves pour déplacer correctement une grue simulée. L'étude pilote semble montrer que leur réalisation du concept d'enseignant virtuel n'améliore pas l'apprentissage des courbes oscillantes.

Figure 11.4. Vue schématique de deux formes de guidage haptique : (a) Guidage Haptique de Position (HGP) : la force perçue par l'utilisateur à l'instant t est proportionnelle au déplacement entre la position à ce moment de l'utilisateur et la position théorique du modèle de trajectoire ; (b) Guidage Haptique de Force (HGF) : la force perçue par l'utilisateur à l'instant t est la même que la force existant pour la trajectoire théorique en même temps (d'après Bluteau et al., 2009).

Plus récemment, Palluel-Germain, Bara, et al., (2007) examinent l'effet de l'utilisation HPG pour entraîner la fluidité dans l'écriture de lettres cursives chez les enfants de maternelle (Chapitre 10). La fluidité d'écriture manuelle est analysée par des paramètres cinématiques comme la vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse, et nombre de pauses pendant la production d'écriture. Elle est testée avant et après les sessions d'entraînement qui est soit un entraînement expérimental visuo-haptique soit un entraînement avec contrôle visuel. Les lettres sont générées par informatique pour contrôler les dynamiques en modifiant la distance entre les points successifs d'une trajectoire définie. Les résultats montrent que les mouvements de la main sont plus rapides, montrent moins de pics de vitesse et que les enfants lèvent le stylo moins fréquemment que pendant l'écriture manuelle après des sessions d'entraînement HPG comparé à l'entraînement de contrôle. En résumé, quelques études chez des adultes et des enfants montrent un effet positif de sessions d'entraînement visuo-haptique utilisant des contrôleurs de position proportionnelle dérivée mais la plupart d'entre-elles décrivent principalement les aspects techniques de la conception du dispositif. Cependant, dans ces études, l'analyse des critères cinématiques est largement explorée.

Le guidage haptique de force (HGF) est une méthode alternative de contrôle, qui est cohérente avec deux principes psychophysiques bien connus (Viviani & Schneider, 1991 ; Viviani & Terzuolo, 1982) : le principe d'homothétie qui postule qu'une trajectoire garde ses caractéristiques formelles quelles que soient sa taille et le principe d'isochronie qui postule que la vitesse de suivi augmente en fonction de sa taille. Henmi et Yoshikawa (1998) comparent les effets de HGF et de HGP dans une tâche d'écriture en plus d'indices visuels. Les résultats montrent que les deux techniques sont aussi efficaces. Srimathveeravalli et Thenkurussi (2005) introduisent un nouveau paradigme fournissant la réplique la plus proche possible de la capacité d'un expert. Les auteurs font l'hypothèse que si la nature des forces générées par l'enseignant et par l'élève est la même, alors leurs trajectoires seraient similaires. Les profils de force de l'enseignant sont alors utilisés pour guider les mouvements d'écriture des élèves. La démonstration de l'efficacité de cette méthode est testée en la comparant avec d'autres méthodes classiques d'entraînement en termes d'appariement de formes avec des lettres indiennes non familières. Les résultats confirment l'hypothèse et montrent qu'une méthode d'entraînement « d'enregistrement et de playback » avec des informations de force est meilleure que les méthodes d'entraînement utilisant seulement le contrôle de position. Malheureusement, cette étude se focalise principalement sur le score de tests d'appariement de formes et n'analyse pas la cinématique. Morris, Tan, Barbagli, Chang, et Salisbury (2007) explorent l'utilisation de feedbacks haptiques pour enseigner une séquence de forces. Les résultats montrent que les adultes sont capables d'acquérir des capacités sensorimotrices via un entraînement visuo-haptique. Ce résultat devrait nous permettre de mieux comprendre les effets positifs de HGF lors des sessions d'entraînement d'écriture manuelle observées par Srimathveeravalli et Thenkurussi (2005).

Bluteau et al., (2009) comparent les deux types de guidance haptique chez des adultes. Ils examinent les effets du contrôle de position (HGP) ou de force (HGF) basé sur les lois

psychophysiques de production de mouvement. L'objectif est de déterminer quelle méthode est la meilleure pour améliorer le suivi visuo-manuel de lettres non familières, arabes et inspirées du japonais (Figure 11.5), et d'ellipses n'ayant pas fait l'objet d'un entraînement. Trois sessions d'entraînement sont proposées, qui diffèrent selon le type de guidage haptique utilisé : HGP ou HGF, ou de guidage non haptique (NHG) Les mouvement sont évalués en termes d'informations sur la forme et de critères cinématiques. Les progrès sont mesurés par la différence de performance entre avant et après les sessions d'entraînement.

Lorsqu'on demande aux participants d'apprendre de suivre visuo-manuellement deux lettres arabes non familières et deux lettres non familières inspirées du japonais, les résultats principaux révèlent une baisse significative du nombre de pics de vitesse pour deux des quatre lettres avec un entraînement HGF. Les résultats montrent que ce type de guidage haptique (HGF) semble être sensible aux trajectoires testées. Néanmoins, il n'y a aucun effet majeur sur le nombre de pics de vitesse et la vitesse moyenne pour le HGP. Il apparait que le HGP n'a aucun effet bénéfique significatif sur la fluidité des mouvements, même si des tendances d'amélioration sont observées. Aucun effet d'entraînement NHG n'est trouvé sur tous les critères d'évaluation. Enfin, aucune méthode d'entraînement n'affecte les critères d'appariement de formes. Le manque d'effet de HGP n'est pas cohérent avec les résultats observés par Feygin et al. (2002) ou par Teo et al. (2002). Ces différences peuvent être expliqués par les différents types de trajectoires utilisées. Par ailleurs, il est possible qu'utiliser les mêmes trajectoires pour l'entraînement et pour les sessions de tests a pu affaiblir le significativité de ces résultats.

Figure 11.5 : vue générale du système : (a) le stylet modifié ; (b) l'interface graphique de l'utilisateur affiché pour l'utilisateur ; (c) un sujet subissant l'entraînement sur l'interface WYSIWYF avec un retour de force mécanique, Phantom Sensable (adapté de Bluteau et al.

2009).

Bluteau et al. (2009) testent alors ces hypothèses en examinant si l'entraînement sur un ensemble de trajectoires avec les deux méthodes de guidage haptique, HGP ou HGF, améliore le suivi visuo-manuel d'un autre ensemble de trajectoires similaires dans les aspects de formes et cinématiques. Ils utilisent la variabilité de forme des stimuli pour améliorer l'efficacité de l'entraînement. La génération d'une gamme de trajectoires requiert une trajectoire de base de haute définition. L'ellipse est choisie, une trajectoire à « deux paramètres », comme celle-ci est bien étudiée dans les études de psychophysique (Viviani & Terzulo, 1982). Il est demandé à des adultes de suivre des ellipses présentées visuellement. Les études psychophysiques montrent qu'il y a une relation sans équivoque entre la production de lettres et les mouvements cinématiques.

Les résultats révèlent que HGF et HGP réduisaient le nombre de pics pendant le suivi visuo-manuel du test de l'ellipse. Ces résultats sont en cohérence avec leurs hypothèses et prolongent ceux de Palluel-Germain et al. (2007) avec des enfants. Dans le groupe contrôle NHG, il semble que le feedback visuel seul n'est pas suffisant pour améliorer les performances. Cependant, seul le mode HGF augmente la moyenne de vitesse dans les tests d'ellipse au contraire de des modes NHG et HGP. Ceci montre que HGF est supérieur à HGP pour améliorer la fluidité des mouvements.

Globalement, Bluteau et al. (2009) observent un effet global positif du mode HGF sur la fluidité de mouvements nouvellement acquis. La supériorité de ce type de guidance haptique suggère que l'information de position est principalement donnée par la modalité visuelle, car il n'y a pas d'amélioration de forme en ajoutant un guidage haptique. De même, l'information cinématique est fournie par la modalité haptique. Elle est probablement encodée en termes de coordonnées de force, plutôt qu'en termes de coordonnées spatiales cartésiennes. Par ailleurs,

cette étude explore l'utilisation de la variabilité dans les sessions d'apprentissage. Les connaissances extraites d'un ensemble de trajectoires elliptiques pendant la période d'entraînement de guidage haptique peut être appliquée à des trajectoires non familières du même type, suggérant un processus de généralisation.

Conclusion

La recherche concernant les dispositifs de toucher virtuel est extrêmement fructueuse. Une grande variété de ces dispositifs existe, et est décrite de manière résumée dans ce chapitre. Nous voyons de grandes avancées technologiques depuis les premières tentatives de systèmes de substitution visuelle (Bach-y-Rita, 1972). Quelques-uns des plus récents dispositifs tactiles sont parvenus à utiliser un ensemble à haute densité (Killebrew et al., 2007). Les stimulateurs ont l'avantage de fournir des informations spatiales en l'absence de vision parmi la population déficiente visuelle, aussi bien qu'ils ont la capacité de fournir des interfaces graphiques d'utilisateur aux ordinateurs. Les interfaces haptiques sont utiles dans l'isolement de la vision mais elles ont une beaucoup plus grande utilité dans l'augmentation d'inputs visuels. Ceci bénéficie à un grand nombre de domaines, depuis l'acquisition de compétences dans l'éducation des enfants, dans l'entraînement en chirurgie, dans l'apport d'informations spatiales aux pilotes. Alors qu'il y a de récentes avancées dans la recherche des meilleures méthodes pour fournir un guidage haptique en conjonction avec la vue, il est évident qu'il reste beaucoup à faire dans ce domaine.