

Simulation sensorielle pour la Réalité Virtuelle : Cas du toucher et de la proprioception

Exposé MOTR – Master 2^{ème} année Recherche en Informatique
Université de Rennes 1 (IFSIC) \ INSA de Rennes

Cédric Fleury

Janvier 2007

Table des matières

1	Introduction	2
2	Le toucher	3
2.1	Théorie	3
2.1.1	Physiologie de la peau	3
2.1.2	Stimulation vibrotactile	4
2.1.3	Stimulation électrotactile	5
2.2	Applications et dispositifs matériels	8
2.2.1	Substitution sensorielle	8
2.2.2	Restitution tactile augmentée	9
2.2.3	Applications en réalité virtuelle	11
3	La proprioception	13
3.1	Sens vestibulaire	13
3.1.1	Système vestibulaire	13
3.1.2	Stimulation galvanique vestibulaire	14
3.1.3	Applications	15
3.2	Sens kinesthésique	16
3.2.1	Récepteurs du sens Kinesthésique	16
3.2.2	Illusion de mouvement	18
3.2.3	Perspectives pour la réalité virtuelle	22
4	Conclusion	23

1 Introduction

L'évolution de la réalité virtuelle, ainsi que la grande diversification de ses domaines d'application obligent les systèmes d'immersion à évoluer vers des systèmes de plus en plus exigeants, que ce soit en terme de performance (qualité, complexité et encombrement minimum,...), mais aussi en terme de compatibilité. On souhaiterait un système d'immersion, qui s'adapterait à un maximum de types d'applications différentes et qui permettrait une restitution sensorielle la plus proche possible de la perception humaine du monde réel.

En réponse à cette problématique, on voit apparaître des solutions qui simulent les sens : au lieu de recréer les phénomènes (images, mouvements, forces,...) pour qu'ils soient perçus par l'utilisateur, on simule directement les sensations perçues par ce dernier, en stimulant les récepteurs sensoriels de son corps. En effet, les avancées de la recherche médicale, en particulier dans le secteur de la neurobiologie, permettent aux médecins de mieux comprendre le fonctionnement du système nerveux dans l'activité sensorielle et les rendent capable de réaliser des simulations sensorielles pour certains des sens. Par ailleurs, les progrès technologiques dans le domaine médical permettent des solutions matérielles plus abordables, que ce soit en terme de coût ou en terme d'accessibilité (capteurs plus performants et plus faciles à installer, outil d'interface logicielle,...). L'utilisation de ces technologies dans les systèmes immersifs des environnements virtuels pourrait permettre d'ouvrir de nouvelles perspectives, grâce à des systèmes qui seraient à la fois plus généraux et plus intuitifs (plus proche du fonctionnement du corps humain).

Cependant, les connaissances médicales actuelles ne permettent pas encore de simuler tous les sens. C'est pourquoi nous nous intéresserons seulement à ceux pour lesquels une simulation sensorielle semble être utile et réalisable : Le cas du toucher et celui de la proprioception¹. En effet, c'est pour le retour tactile et le retour proprioceptif que les progrès sont les plus prometteurs : les dispositifs qui existent actuellement pour ces types de retour sont plutôt des dispositifs qui reproduisent les éléments à ressentir (dispositif à retour d'effort, matrice d'aiguilles pour recréer les surfaces, plates-formes mobiles,...), au lieu de simuler les sensations directement, comme les chercheurs en neurobiologie commencent à savoir le faire pour ces sens.

Nous allons examiner l'état des connaissances actuelles concernant la simulation sensorielle et quelles en sont les applications pour le domaine de la réalité virtuelle. Dans un premier temps, nous étudierons ce qui existe pour le toucher. Puis dans un deuxième temps, nous verrons le cas de la proprioception, que nous décomposerons en deux parties : le sens kinesthésique et le sens vestibulaire.

¹La proprioception regroupe les sensations provenant du corps lui-même et renseignant sur la position dans l'espace, les attitudes, les mouvements, l'équilibre, etc...

2 Le toucher

L'absence du toucher dans un monde virtuel ôte une source d'informations [1], ce qui peut être gênant pour certaines simulations virtuelles ainsi qu'en téléopération. Si l'on arrive à recréer un retour tactile dans les environnements virtuels, on pourra non seulement rendre les systèmes immersifs plus réalistes, mais aussi réaliser des tâches plus difficiles. Si l'ensemble de la peau participe au sens du toucher, il est important de noter qu'il est surtout efficace au niveau des mains : grâce à celles-ci, on peut déterminer par toucher la géométrie de la surface en contact, sa rugosité, sa température et son mouvement relatif.

Les dispositifs mécaniques qui permettent un retour tactile sur la peau (matrice d'aiguilles, dispositif pour étirer la peau,...) sont généralement très encombrants, difficiles à utiliser, et surtout ils ne permettent pas de reproduire toutes sortes de sensations cutanées. C'est pourquoi des dispositifs de simulation sensorielle sont aujourd'hui utilisés dans le médical et commencent à apparaître dans le domaine de la réalité virtuelle.

2.1 Théorie

2.1.1 Physiologie de la peau

La peau humaine contient six types de récepteurs tactiles différents [11]. Mais pour l'instant, le fonctionnement de seulement quatre types de récepteurs a été clairement identifié. En conséquence, les différents articles ne citent en général que quatre types de mécanorécepteurs pour la peau humaine (cf figure 1).

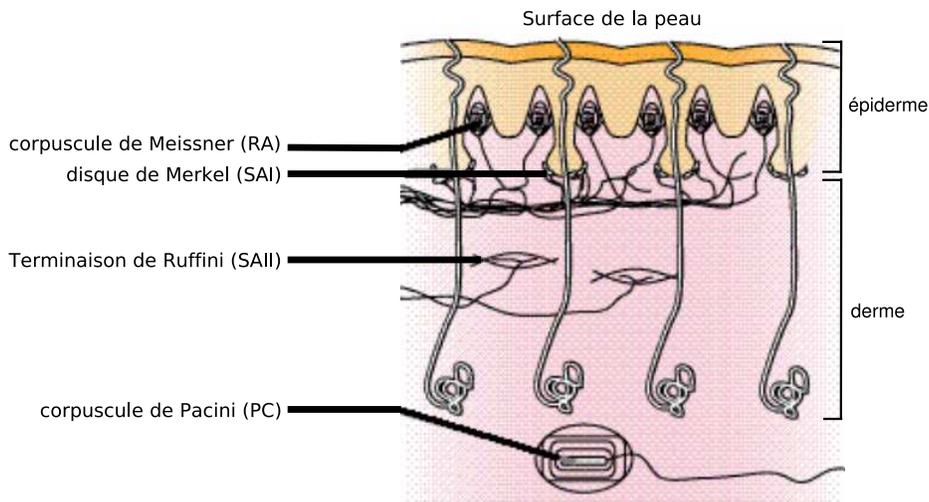


FIG. 1 – Les mécanorécepteurs de la peau (traduit de [18])

Chacun des types de récepteur a des caractéristiques propres bien définies. Cela permet à chaque type de percevoir des aspects différents des sensations tactiles (pression, vibration, étirement,...). Le tableau de la figure 2 regroupe les informations sur ces quatre types de récepteurs sensoriels, grâce aux informations de [11] [4].

Récepteur	Sensations corrélées	Taille du champ récepteur	Vitesse d'adaptation	Durée de perception	Récepteur/cm ² bout des doigts (paume de la main)
Corpuscule de Pacini (PC)	Vibration rapide	Large (env. 10 mm ²)	Rapide	Ne dure pas	21 (9)
Corpuscule de Meissner (RA)	Pression rapide : tremblement, frottement	Petit (env. 1 mm ²)	Rapide	Ne dure pas	140 (25)
Terminaison de Ruffini (SAII)	Étirement Tension	Large (env. 7 mm ²)	Lente	Tant que le stimulus est présent	9 (15)
Disque de Merkel (SAI)	Pression lente : enfoncement de la peau	Petit (env. 1 mm ²)	Lente	Tant que le stimulus est présent	70 (8)

FIG. 2 – Caractéristiques des mécanorécepteurs de la peau

Généralement, les études, qui s'intéressent à simuler le toucher dans les doigts, ne tiennent pas compte des terminaisons de Ruffini étant donné qu'elles sont très peu nombreuses dans la peau des doigts.

Kajimoto et al [13] distinguent ces récepteurs selon trois autres caractéristiques :

- Chaque sorte de mécanorécepteur se situe à une profondeur différente dans la peau (cf figure 1).
- Les fibres nerveuses (axones), qui connectent chaque type de récepteurs, ont des diamètres spécifiques différents. Le diamètre des axones des RA (3~5 μ m) est deux fois plus petit que celui des axones des SAI et PC.
- L'orientation de ces axones diffère selon les récepteurs qu'elles connectent. Il semblerait que les axones des RA soient perpendiculaires à la surface de la peau. Tandis que ceux des SAI et PC seraient parallèles à cette surface. Cependant, il n'existe pas d'étude qui le prouve formellement.

Enfin, il existe aussi des terminaisons nerveuses libres (connectées à aucun mécanorécepteur) qui servent à percevoir les sensations de douleurs, de chaud et de froid. Ce sont des axones de très petit diamètre (inférieur à 1 μ m).

2.1.2 Stimulation vibrotactile

D'après [11], il a été tenté de stimuler les mécanorécepteurs par des micro-vibrations. Cependant, les connaissances actuelles ne nous permettent pas de

réussir à stimuler séparément les différents types de récepteurs. En effet, les expériences qui ont été tentées n'aboutissent pas aux résultats souhaités. Par exemple, on a une meilleure localisation de la sensation en stimulant les PC, qui ont normalement un champ de perception plus grand que celui des autres récepteurs. Peut-être qu'avec une meilleure connaissance sur le fonctionnement des mécanorécepteurs, des solutions par stimulation vibrotactile seront envisageables. Mais en attendant, les chercheurs semblent plutôt s'orienter vers des solutions utilisant une stimulation électrique.

2.1.3 Stimulation électrotactile

La stimulation électrotactile consiste à faire passer un courant électrique dans la peau grâce à des électrodes cutanées. Il est ainsi possible de stimuler et donc d'envoyer de l'information dans les fibres nerveuses afférentes afin de simuler les signaux émis par les récepteurs. Certains chercheurs suggèrent également la possibilité de stimuler directement les mécanorécepteurs grâce à des électrodes inférieures à un millimètre carré [11]. Enfin, certaines expériences utilisent des électrodes sous-cutanées, qui présentent comme avantages une meilleure qualité et une meilleure stabilité de stimulation, mais elles obligent une implantation sous la peau.

Toujours d'après [11], les sujets décrivent et classent les sensations perçues dans l'ordre suivant : picotement, démangeaison, vibration, bourdonnement, toucher (contact), pression, pincement, piqûre, ainsi que douleur et brûlure. Ces différentes sensations sont obtenues en fonction du voltage, de l'intensité et de la fréquence de la stimulation, de la taille, de la localisation, de la matière et de la force de contact de l'électrode, ainsi que de l'épaisseur et de l'hydratation de la peau.

Kajimoto et al [13] décrivent un système d'électrodes cutanées qui permet de stimuler les trois types de mécanorécepteurs des doigts de la main (sans tenir compte des récepteurs SAI qui sont très peu nombreux à cet endroit) séparément les uns des autres. Ils utilisent les différentes caractéristiques de chacun des récepteurs RA, PC et SAI pour les stimuler séparément, grâce à un tableau d'électrodes à une dimension et pour obtenir ainsi une sensation bien particulière.

Sélection par la profondeur : On stimule les axones des SAI, qui sont moins profonds que ceux des PC, grâce à une cathode entourée d'anodes. Alors qu'on stimule les axones des PC en utilisant un tableau de plusieurs cathodes côte à côte (cf figure 3). Par ailleurs, pour ne pas stimuler les axones des SAI, lorsqu'on stimule les axones des PC, on joue sur les fréquences des signaux électriques. En effet, à partir de 200 Hz, les informations des SAI ne sont plus ressenties, alors qu'il faut atteindre 1000 Hz pour les PC. On utilise donc une fréquence supérieure à 200 Hz lorsque l'on stimule les PC.

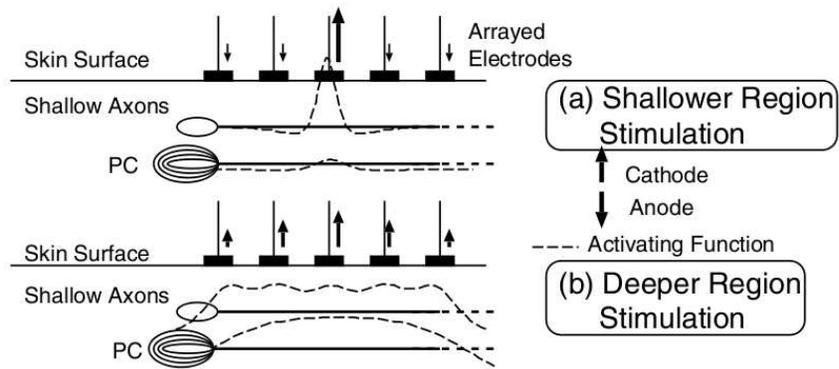


FIG. 3 – Sélection par la profondeur (source : [15])

Sélection par l'orientation : On stimule les axones des RA grâce à une anode qui a la propriété de stimuler uniquement les axones perpendiculaires à la peau. Tandis qu'une cathode permet de stimuler les axones parallèles à la peau comme les axones des SAI. (cf figure 4).

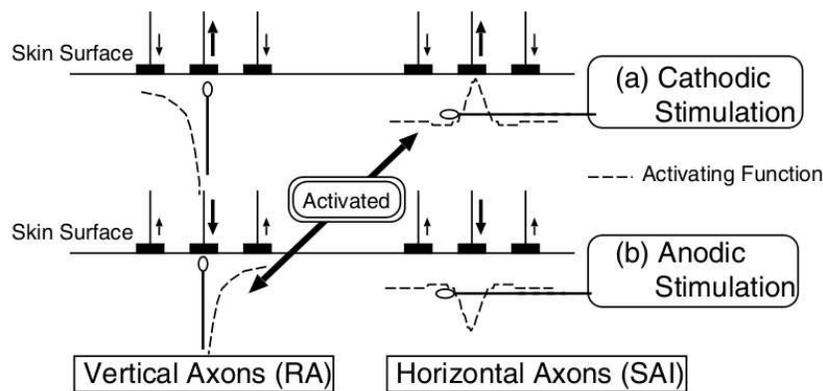


FIG. 4 – Sélection par l'orientation (source : [15])

Sensations ressenties (par expérience) :

- En mode RA : légère vibration, picotement
- En mode SAI : pression, et si le sujet change la force de contact de son doigt, il a l'impression de toucher un matériau mou.
- En mode PC : vibration

Kajimoto et al comparent les trois modes de stimulation obtenus aux trois composants primaires des images (rouge, vert, bleu), qui stimulent les différents cônes de la rétine. De la même façon, il pense qu'en combinant ces trois modes, on serait capable de reproduire toutes les sortes de sensations cutanées comme on sait le faire pour les images à partir des composantes RVB.

Dans un autre article [15], Kajimoto et al présentent un tableau d'électrodes à deux dimensions qui reprend les principes précédents (cf figure 5).

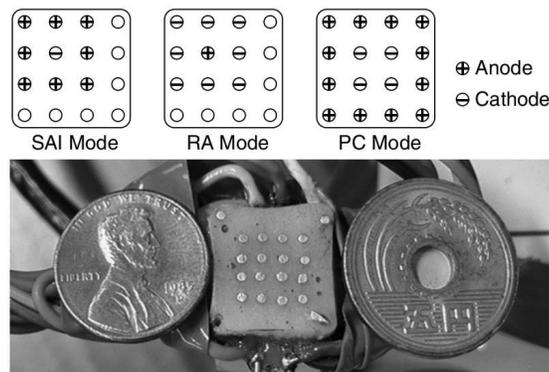


FIG. 5 – Modes de stimulations dans le cas 2D (source : [15])

Ce système permet de reproduire soit une surface, soit le mouvement de l'objet ressenti. On pourrait par exemple sentir le déplacement d'un picot sur le bout de son doigt (cf. figure 6).

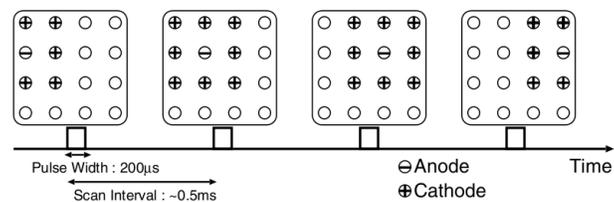


FIG. 6 – Simulation de mouvement en mode SAI (source : [15])

Problèmes et limites actuels de la stimulation électrotactile

Il subsiste actuellement deux problèmes principaux [14] :

- Il n'est pas toujours facile de localiser précisément les sensations dans une zone très petite. En effet, il y a parfois un décalage entre l'endroit où est situé l'électrode et l'endroit où l'on ressent réellement la stimulation (cf figure 7).

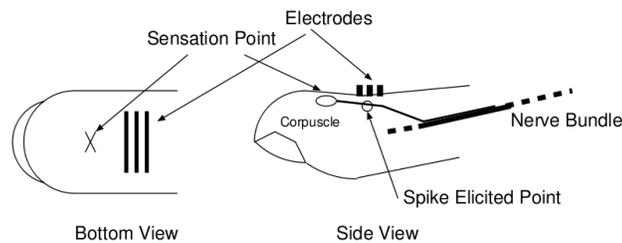


FIG. 7 – Décalage électrode/point de sensation (source : [13])

Une des solutions pourrait être d'utiliser des micro-électrodes et de stimuler directement les mécanorécepteurs [11]. Sinon, Kajimoto et al [14] proposent d'utiliser uniquement la stimulation avec anode, qui stimule uniquement les axones perpendiculaires à la peau, afin de minimiser le décalage ressentie.

- La relation entre l'intensité du courant et la sensation générée est parfois instable et peut causer des désagréments, voire des douleurs. Kajimoto et al [14] ont mis au point un système qui permet de mesurer la pression du doigt sur l'électrode (force de contact) et de réguler l'intensité du courant envoyé en fonction de cette force. Ce système permet, en partie, de solutionner le problème.

2.2 Applications et dispositifs matériels

2.2.1 Substitution sensorielle

La substitution sensorielle consiste à utiliser un des sens de l'homme pour recevoir les informations reçues normalement par un des autres sens [11]. Pour le toucher, cette définition peut être étendue au fait d'utiliser une zone de la peau pour recevoir les informations tactiles reçues normalement par une autre zone.

Dés les années 70, des applications de la simulation tactile apparaissent dans le domaine médical pour réaliser de la substitution sensorielle. Généralement, ces applications s'adressent à des personnes handicapées, en particulier les aveugles et les sourds. On peut citer rapidement le substitution tactile de la vision, qui permet de transformer des images en informations tactiles transmises aux bouts des doigts par des matrices d'électrodes de types « fingertip-scanner » (cf figure 8). Les aveugles sont alors capables de reconnaître les lignes horizontales, verticales et diagonales, ainsi que, avec un peu d'entraînement, des objets et des visages.

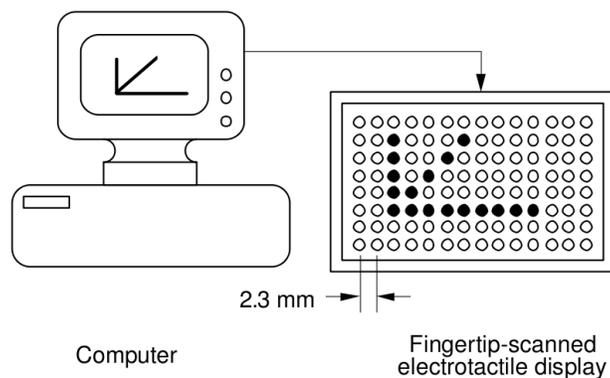


FIG. 8 – Conversion vision/toucher

Il existe également des dispositifs qui utilisent la substitution sensorielle dans la téléopération, pour faire sentir à une personne, manipulant un robot à distance ou effectuant une opération chirurgicale à distance, des informations supplémentaires à celles de l'image et du son.

Cependant, ce type d'applications nous intéresse moins dans le cadre de la réalité virtuelle étant donné que l'on ne reproduit pas des sensations réelles. En effet, l'objectif est de reproduire les sensations du toucher alors que la substitution sensorielle convertit un autre sens en retour tactile. On peut tout de même réaliser un rapide panorama de certains dispositifs matériels utilisés lors de ces applications [10](cf figure 9) :

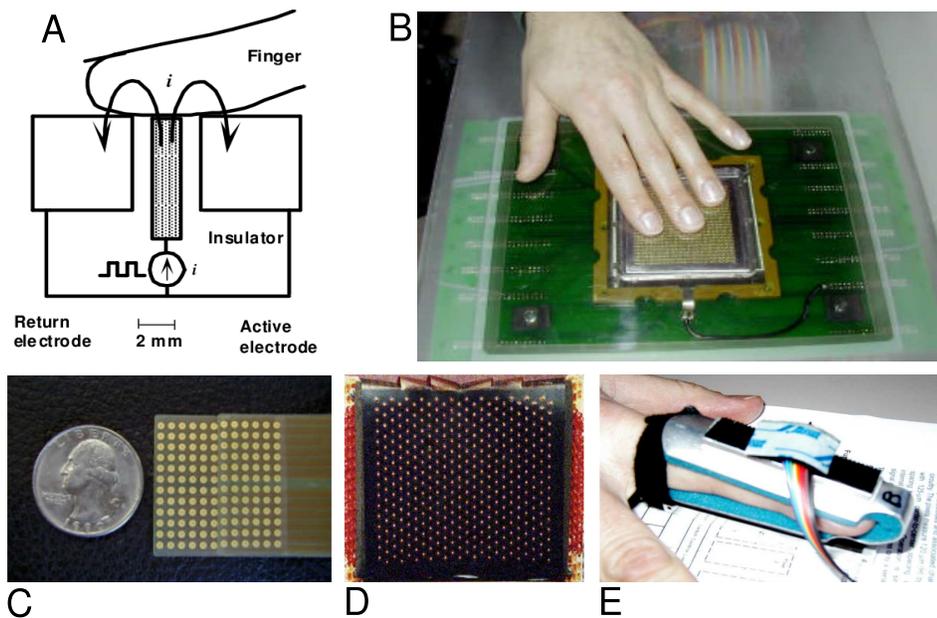


FIG. 9 – Dispositifs de stimulation électrotactile

- A Simple électrode pour le bout du doigt (1994)
- B Matrice d'électrodes sur laquelle on peut déplacer le bout des doigts : « Fingertip-scanner » (1997)
- C Système électrotactile pour le langage (1998)
- D Système électrotactile abdominal (2000)
- E Gant électrotactile pour le doigt (2002)

2.2.2 Restitution tactile augmentée

Dans le cas du toucher, on peut définir la réalité augmentée [12] comme permettant de toucher quelque chose que l'on ne peut pas toucher. Un système « classique » d'haptique augmenté se compose généralement d'un dispositif de retour tactile ainsi que de capteurs (pour détecter ce qui ne peut pas être touché).

Une des premières utilisations de la stimulation électrotactile date de 1987. Kaczmarek et al [11] citent une étude cherchant à résoudre le problème du manque de sensations des astronautes lors des sorties extra-véhiculaires. En effet, les gants de leur combinaison pressurisée réduisent considérablement le sens du toucher, ce qui provoque une fatigue beaucoup plus rapide des mains. Cette étude propose d'utilisation de gants avec des capteurs de pression sur l'extérieur qui contrôlent l'intensité d'une stimulation électrotactile sur les doigts à l'intérieur.

Pour ce qui est de la réalité augmentée comme nous la connaissons aujourd'hui, une application beaucoup plus récente (2003) est le dispositif « SmartTouch » développé par Kajimoto et al [12]. A la différence de ses prédécesseurs mécaniques (par exemple « SmartTool » ou « SmartFinger »), ce dispositif utilise la stimulation électrotactile pour restituer les sensations. Il est donc composé, d'un côté par un tableau d'électrodes, de l'autre par un tableau de capteurs optiques, et par un capteur de pression entre les deux (cf figure 10).

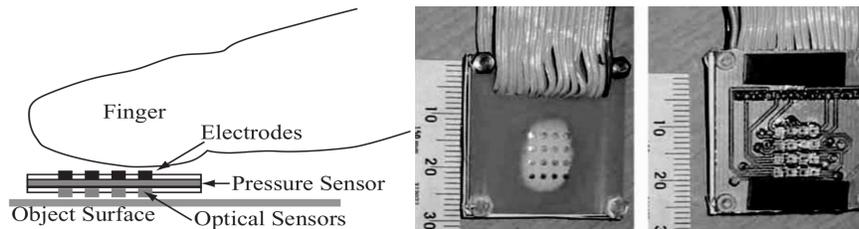


FIG. 10 – Prototype du dispositif SmartTouch (Source : [12])

Les images visualisées par les capteurs optiques sont transformées en informations tactiles, qui sont alors retransmises sous forme de stimulations électriques. Afin de réduire la latence, le processus de capture des images et celui de génération des stimulations électriques sont effectués en parallèle. Le capteur de pression permet juste de réguler l'intensité du courant électrique émis.

Ce système permet la reconnaissance d'éléments imprimés sur une surface plate. Par exemple, dans l'expérience, on cherche à reconnaître des lignes noires imprimées sur un papier blanc (cf figure 11). Mais il pourrait également être utilisé pour recréer du relief ou des textures sur un élément lisse.

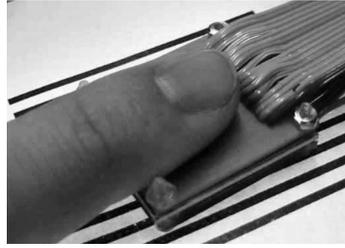


FIG. 11 – Utilisation de SmartTouch (Source : [12])

2.2.3 Applications en réalité virtuelle

Il existe encore très peu d'applications utilisant la simulation tactile en réalité virtuelle. Cela est sûrement dû au fait que les découvertes médicales dans le domaine sont relativement récentes et que par conséquent, l'utilisation de la stimulation électrotactile pose certains problèmes (cf partie 2.1.3). Cependant, avec l'amélioration des connaissances médicales et des moyens techniques, on commence à voir apparaître des applications concrètes.

Lors de nombreux travaux, des dispositifs à retour tactile ont déjà été montés sur des souris d'ordinateur. C'est pourquoi, en 2001, Kajimoto et al [14] réalisent une souris appelée « Electric Mouse » qui est la version utilisant des électrodes cutanées, de ces travaux. Cette souris est l'implémentation des recherches de Kajimoto et al sur la stimulation électrotactile. En effet, elle est constituée d'une matrice de 4x4 électrodes, identiques à celles de [15], située au centre de la souris (cf figure 12). Un capteur de force est situé juste sous les électrodes afin de mesurer la pression du doigt et de réguler l'intensité du courant émis par les électrodes.



FIG. 12 – Electric Mouse (Source : [14])

En accord avec les mouvements de la souris, le mode de stimulation de chacune des électrodes est changé afin que l'utilisateur ressente l'existence d'un objet stationnaire sous la peau. Par ailleurs, la fréquence des stimulations est réglée en fonction de la vitesse de déplacement de la souris, ce qui permet de percevoir la vitesse de déplacement du doigt par rapport à la surface virtuelle et donc

de ressentir les différentes textures. Après la réussite des expériences réalisées grâce à cette souris et afin d'augmenter le réalisme, une souris comportant 64 électrodes a été réalisée (cf figure 13).



FIG. 13 – Souris électrotactile à 64 électrodes (Source : [14])

En 2005, Oktay et al [18] présentent un système de retour électrotactile (ETCS). Ce système permet, grâce à une matrice de 32 électrodes fixées sur la paume de la main, de reproduire la rugosité des surface, le relief des formes, ainsi que leur mouvement. Cette article donne une explication très technique et surtout matérielle de ce système. Cependant, ce dispositif semble très expérimental : la calibration se fait par 32 potentiomètres reliés chacun à une électrode,... Par ailleurs, il n'y pas de description logicielle du système et il ne semble pas qu'il soit couplé à un dispositif immersif dans un monde virtuel.

Les résultats obtenus grâce à ce système sont pour l'instant uniquement des valeurs pour mieux calibrer le dispositif. L'article conclut en disant que les travaux futurs vont s'orienter vers la modélisation tactile d'un objet dans un monde virtuel, en utilisant ces valeurs.

En conclusion, on peut souligner que les avancées technologiques permettent de voir apparaître des dispositifs de retour tactile par stimulation électrotactile. Cependant, il reste beaucoup de chemin à faire du point de vue logiciel, afin de modéliser les caractéristiques tactiles des objets d'un environnement virtuel pour permettre une stimulation électrique adaptée. On pourrait ainsi coupler les retours électrotactiles avec l'exploration d'un monde virtuel.

3 La proprioception

Pour avoir l'illusion d'être immergé, le sujet doit pouvoir ressentir son corps dans le monde virtuel dans lequel il se trouve. Il doit donc pouvoir percevoir sa position dans l'espace, les mouvements de son corps et les forces qui s'exercent sur ses muscles au travers d'un retour proprioceptif relatif à l'environnement virtuel. Les deux sens qui interviennent pour restituer la proprioception sont :

- le sens vestibulaire, relatif à la perception de l'oreille interne. C'est lui qui permet de percevoir la verticale gravitaire, les mouvements et les accélérations de sa tête tant en translation qu'en rotation.
- le sens kinesthésique, relatif à la perception interne du corps humain. C'est lui qui permet de sentir la position des différents segments du corps, leur direction, leurs mouvements relatifs, et les forces qui leur sont exercées.

Même si la vision joue également un rôle important et non négligeable dans la proprioception, elle est généralement traitée à part, étant donné qu'elle est traitée en premier pour permettre l'immersion.

3.1 Sens vestibulaire

Pour l'instant, la restitution de l'équilibre et des accélérations dans les environnements virtuels passent forcément par l'utilisation de systèmes mécaniques (plate-forme mobile, cabine de simulateur,...), qui sont très encombrants, très coûteux et aussi très spécialisés (On peut voir dans [1] des cabines mobiles spécifiques à des simulateurs d'avion et même à un simulateur d'engin d'abat-tage d'arbre). Bien maîtrisé depuis quelques temps dans le domaine médical, la stimulation galvanique vestibulaire commence à faire son apparition dans le domaine de la réalité virtuelle. Cette solution utilise un dispositif matériel beaucoup plus simple, qui n'a pas les contraintes précédentes des systèmes mécaniques. Par conséquent, cette solution est un bon exemple des améliorations permises par la simulation sensorielle.

3.1.1 Système vestibulaire

Son Rôle Le rôle du système vestibulaire est de capter les mouvements et le positionnement de la tête par rapport à la gravité. Les informations captées sont à la fois utilisées pour développer la sensation subjective de mouvement et du positionnement de la tête dans l'espace, mais aussi pour contrôler les muscles qui permettent le maintien de la posture et la stabilisation de la vue (réflexes moteurs de contrôle posturale et oculomoteur). D'après [2], on peut décomposer en trois, le rôle du système vestibulaire :

- Il permet le maintien de l'équilibre postural automatique, tant statique que dynamique (réflexes vestibulo-spinaux).
- Il règle la position et le mouvement oculaire afin d'assurer le maintien

d'une vision stable lors des mouvements de la tête (réflexe vestibulo-oculaire).

- Il contribue enfin à la construction d'un modèle interne au niveau cortical par l'apport de références sur la position et le déplacement de la tête dans l'espace.

Rapide description anatomique Les organes sensoriels vestibulaires sont constitués de deux sous-systèmes contenus dans l'oreille interne (cf figure 14) : les trois canaux semi-circulaires et le système utriculo-sacculaire, qui fournissent des renseignements sur l'ensemble des mouvements et qui contrôlent et maîtrisent certains muscles.

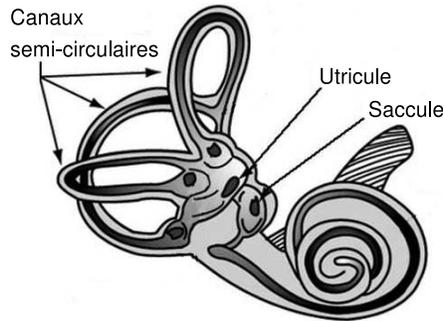


FIG. 14 – Système vestibulaire

Les canaux semi-circulaires situés dans les trois plans de l'espace sont sensibles aux accélérations angulaires de la tête, c'est à dire aux mouvements de rotation de la tête. Tandis que l'utricule et le saccule sont sensibles d'une part aux accélérations linéaires de la tête, c'est à dire aux mouvements de translation de la tête, et d'autre part à la position de la tête par rapport à la gravité. Les récepteurs sensoriels, qui sont connectés à chacun de ces deux systèmes, transmettent aux neurones vestibulaires primaires un signal correspondant à la position ou au déplacement de la tête. Puis les neurones vestibulaires secondaires transmettent aux différents muscles les ordres qui permettent les différents réflexes moteurs.

3.1.2 Stimulation galvanique vestibulaire

La stimulation galvanique vestibulaire [3] consiste à envoyer un courant constant de faible intensité, soit entre deux électrodes situées juste derrière les oreilles (stimulation bilatérale), soit entre une électrode frontale et une électrode située derrière une des oreilles (stimulation unilatérale). Ces stimulations dépolarisent les neurones vestibulaires primaires du côté de l'anode et inhibent leur décharge du côté de la cathode. Il en résulte une asymétrie de la stimulation électrique des neurones vestibulaires secondaires entre les deux côtés du corps, et par conséquent, une déviation momentanée de la verticale au niveau de la perception, de la posture et aussi de la vision. Pour simplifier,

la stimulation galvanique vestibulaire [16] entraîne un déplacement de la verticale perçue vers la cathode et donc un déséquilibre vers l'anode (cf figure 15).

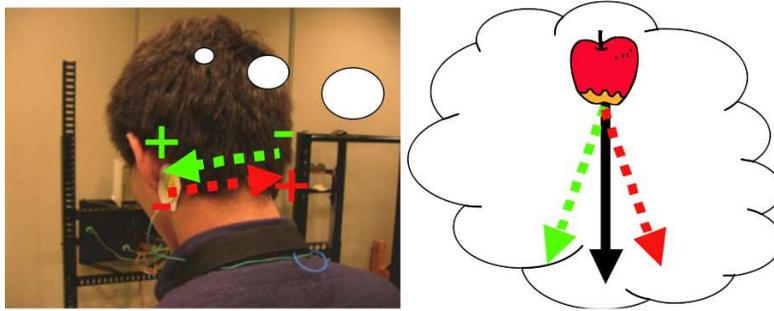


FIG. 15 – Modification de la verticale perçue (Source : [16])

La principale limite de la stimulation galvanique vestibulaire réside dans le fait qu'aujourd'hui, on ne peut pas modifier l'équilibre d'avant en arrière et donc simuler les accélérations vers l'avant ou l'arrière. Cette limite réside dans les caractéristiques de la stimulation, qui crée juste une différence électrique entre le récepteur vestibulaire de gauche et celui de droite.

3.1.3 Applications

Les chercheurs du NTT (télécom Japonais) ont mis au point un dispositif très simple pour réaliser la stimulation galvanique vestibulaire. Ce dispositif ressemble à un casque pour écouter de la musique, à la différence qu'il est composé de deux électrodes, et se place juste derrière les oreilles. Maeda et al [16] propose différentes applications de leur dispositif, assez originales pour certaines :

- L'application « Radio-Controlled Walking » consiste à déséquilibrer latéralement un utilisateur en train de marcher afin de modifier sa direction. On peut ainsi contrôler la direction de marche d'un utilisateur. Cette application pourrait être utilisée en réalité augmentée afin de diriger l'utilisateur dans un environnement (exemple : couplage avec un GPS, aide pour les aveugles).
- L'application qui semble avoir pour l'instant le plus d'impact sur la réalité virtuelle est celle qui consiste à recréer l'équilibre et les accélérations latérales dans les systèmes immersifs. Maeda et al ont présenté un jeu vidéo de course de voiture dans lequel la force centrifuge était restituée dans les virages.
- La dernière application proposée est définie comme un nouveau média de divertissement. Cela consiste à faire bouger le monde et la vision de l'utilisateur de façon synchronisée avec le rythme d'une musique, ce qui semble créer de nouvelles sensations !

En dehors de ces applications « originales », les applications dans la réalité virtuelle sont très nombreuses. Une étude [17] a montré que combiner à un système de visualisation, non seulement ce dispositif augmente considérablement la sensation de mouvement, mais permet aussi de réduire fortement le « mal des simulateurs ». En effet, ce dernier est principalement dû au conflit qui existe entre ce que l'utilisateur voit (image en mouvement) et ce qu'il sent (utilisateur immobile). Le fait de simuler les sensations vestibulaires supprime le conflit et donc une partie du mal ressenti. Ce casque de stimulation galvanique vestibulaire pourrait être utilisé dans toutes les applications qui reproduisent des déséquilibres ou des accélérations du monde virtuel (simulateur de véhicule,...) afin de remplacer les plateformes mobiles actuelles. Mais aussi, vu le faible investissement que représente ce dispositif (comparé à un dispositif mécanique), on peut penser que son utilisation va s'étendre à de nombreux systèmes immersifs dans des mondes virtuels dans le but de rendre les mouvements plus réalistes ou tout simplement de supprimer le « mal des simulateurs ».

3.2 Sens kinesthésique

Le sens kinesthésique permet de ressentir la position des différents segments du corps, leurs mouvements relatifs, ainsi que les forces de contractions musculaires nécessaires à la résistance aux mouvements ou aux poids des objets. Les informations perçues proviennent des récepteurs sensoriels présents dans les muscles, les tendons et les articulations.

Les nombreux dispositifs mécaniques, qui existent aujourd'hui (bras ou gant à retour d'effort,...), exercent uniquement une force afin de restituer les forces appliquées sur les segments. Pour la position et le mouvement des parties du corps, l'utilisateur ressent ceux de son corps dans le monde réel. Cela ne pose pas de problème pour des applications simples, qui se déroulent dans un univers semblable au monde réel. Mais on ne peut pas réaliser des applications où les contraintes physiques du monde virtuel sont différentes de celles du monde réel. Par exemple d'après [1], il est très difficile, voire impossible, de simuler les changements de gravité et la création d'un monde virtuel de vol spatial n'est pas encore pour demain. Par ailleurs, les dispositifs mécaniques sont lourds et encombrants, ce qui nuit parfois à l'immersion car l'utilisateur ressent la présence du dispositif. Pour l'instant, il n'existe pas encore de système qui simule les sensations kinesthésiques en réalité virtuelle. Cependant, les récentes expériences médicales sur la simulation du mouvement laissent penser qu'il serait possible de simuler le mouvement et la position des segments du corps afin de résoudre les problèmes précédents.

3.2.1 Récepteurs du sens Kinesthésique

Les récepteurs kinesthésiques se trouvent dans les muscles, les tendons et les articulations. En voici, une rapide description anatomique d'après [5] [6].

Les mécanorécepteurs musculaires : les fuseaux neuro-musculaires

Ces récepteurs se situent directement dans le muscle parmi les fibres musculaires (cf figure 16). Ils sont innervés par les fibres afférentes primaires Ia (fibres nerveuses).

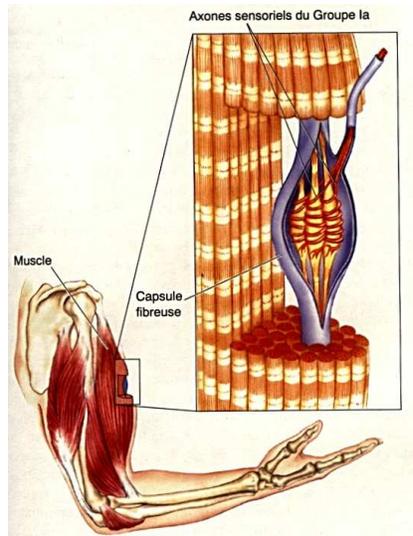


FIG. 16 – Fuseau neuro-musculaire

Si le muscle et donc les fuseaux neuro-musculaires sont étirés, un message dont la fréquence est proportionnelle au degré d'étirement est transmis au système nerveux central, par ces fibres nerveuses. A l'inverse, si le muscle se raccourcit par contraction, la tension dans les fuseaux baisse ainsi que la fréquence de l'influx nerveux dans les fibres nerveuses afférentes. De cette manière, les fuseaux neuromusculaires sont des indicateurs de la longueur du muscle.

Les mécanorécepteurs tendineux : Les organes tendineux de Golgi

Ces récepteurs, situés à la jonction du tendon et du muscle (cf figure 17), sont spécifiquement sensibles à la tension du tendon. Ils sont innervés par les fibres afférentes Ib.

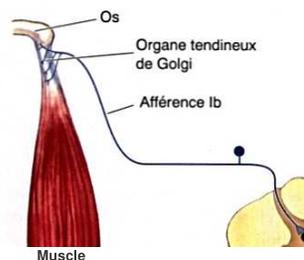


FIG. 17 – Organe tendineux de Golgi

Ils sont donc excités lorsque la tension augmente, et cela d'une manière plus importante lors d'une contraction active que pour un étirement passif. Les organes tendineux de Golgi présentent une sensibilité dynamique très développée et renseignent le système nerveux central sur les variations de la force contractile du muscle (stimulus = contraction musculaire active).

Les mécanorécepteurs articulaires Ces récepteurs sont constitués en majorité par les récepteurs de Ruffini des capsules articulaires. Ils nous intéressent moins étant donné qu'ils ne sont actifs que pour un angle précis d'activation, proche des positions extrêmes du membre (flexion ou extension).

3.2.2 Illusion de mouvement

Expériences par stimulation électrique Dès 1985, Gandevia [9] crée une illusion de mouvement des doigts par une stimulation électrique afin de prouver que les récepteurs des muscles ont un rôle dans la perception kinesthésique.

Méthode expérimentale :

Les sujets sont assis avec les deux bras posés sur une table, les paumes des mains tournées vers le haut et les mains dans une position de repos. Durant les tests, ils ne voient pas leurs mains.

On stimule le nerf ulnaire (cf figure 18), qui est le nerf innervant la paume de la main, l'annulaire et l'auriculaire, grâce à des électrodes situées sur la face intérieure du bras et après la ramification de la branche dorsale (plus vers l'extrémité du bras).

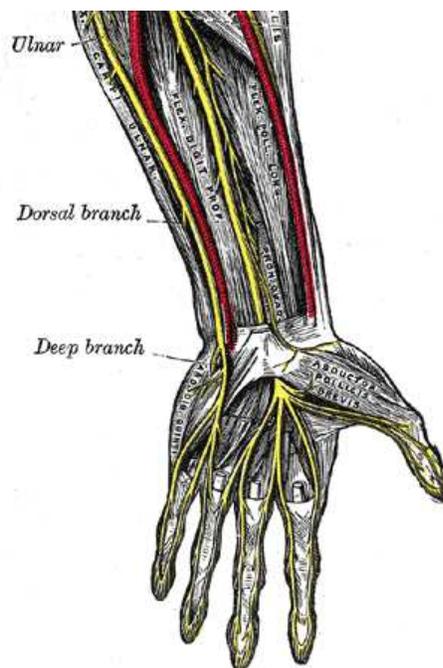


FIG. 18 – Nerf Ulnaire

Les stimulations au travers d'un nerf entier excitent d'abord les axones de plus gros diamètre. Étant donné que ce sont les fibres afférentes primaires Ia qui ont le plus gros diamètre, on commence par déterminer quelle tension maximum peut être appliquée pour les stimuler sans stimuler les axones connectés aux récepteurs sensoriels de la peau.

Résultats :

- Pour 12 sur 17 sujets, les stimulations électriques produisent une illusion de mouvement d'extension de la paume de la main, ainsi que des doigts concernés sans que les enregistrements ne décèlent d'activité électrique des muscles. De plus, les sujets ne ressentent pas de sensations cutanées, ni de sensations de force, de tension ou d'effort dans les muscles.
- Quand on permet au sujet de voir leur main, ils sont très surpris de voir que leurs doigts sont immobiles. La vision des mains pendant la période de stimulation annule l'illusion de mouvement pour certains sujets et tous les sujets trouvent que les sensations de mouvement sont plus faciles à décrire quand les mains sont cachées.
- Gandevia met en évidence que la vitesse du mouvement ressenti dépend de la fréquence de la stimulation électrique.
- A l'époque, la même technique appliquée aux doigts de la main ne permet pas un bon résultat. En effet, la stimulation produit seulement des sensations cutanées parasites pour 5 sujets sur 12 et pour les 7 autres sujets, il y a une sensation de mouvement mais accompagnée de vibration ou d'oscillation.

En 1996, une étude [7] visant à caractériser les différentes techniques de stimulation expérimente une autre technique de stimulation électrique.

Méthode expérimentale :

Douze paires d'électrodes sont placés sur les doigts de la main (sauf sur le pouce) à trois endroits différents (cf figure 19). L'anode est séparée de la cathode d'un centimètre.

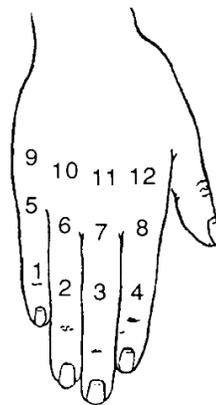


FIG. 19 – Emplacement des 12 paires d'électrodes (Source : [7])

Deux ordinateurs avec des interfaces CED 1401 (Cambridge Electronic Design) sont utilisés pour moduler les fréquences de chacune des paires d'électrodes en phase.

Résultats :

La stimulation évoque une illusion claire de mouvement de flexion des doigts de la main chez 6 des 17 sujets (35%) et une illusion vague de mouvement (mouvement faible ou sensations cutanées supplémentaires) pour 3 sujets en plus (soit 9/17 sujets (53%) ressentent quelque chose). Vu les résultats peu satisfaisants d'illusion de mouvement par stimulation électrique, les recherches s'intéressent plus aux techniques de stimulation par vibrations sur les tendons.

Expériences par vibration Cela fait plus de trente ans qu'il existe des expériences créant une illusion de mouvement, grâce à l'application de vibration sur le tendon d'un muscle. Cette technique permet de stimuler les fuseaux neuro-musculaires du muscle et ainsi de transmettre dans les fibres afférentes primaires Ia des trains de potentiels d'actions dont les modulations en fréquence sont exactement identiques à la fréquence des vibrations appliquées. Lorsqu'on applique de telles vibrations sur le tendon d'un muscle, on évoque donc une illusion de mouvement dans la direction correspondante à celle d'un mouvement qui aurait entraîné l'étirement du muscle vibré.

Pour l'instant, cette technique de stimulation par vibration est de loin la plus performante. En effet, dans l'étude comparative de Collins de 1996 [7], on obtenait une illusion de mouvement pour environ 88% des sujets par vibration sur les tendons contre seulement 35% par stimulation électrique.

Aujourd'hui, on a dépassé le stade de la simple illusion de mouvement où l'on faisait juste ressentir un mouvement. En effet, on est actuellement capable de simuler un mouvement complexe bien défini mettant en œuvre plusieurs muscles afin de recréer une action précise du membre. Cela est possible grâce aux enregistrements qui sont effectués par microneurographie [19]. Cette technique consiste à enregistrer, à l'aide d'une micro-électrode insérée dans un nerf superficiel chez l'homme, les messages nerveux émis par les récepteurs et adressés au système nerveux central. Ces enregistrements permettent donc de restituer avec fidélité l'activité de chacun des muscles lors d'une action définie. On est alors capable de créer l'illusion d'un mouvement identique à celui durant lequel on a effectué les enregistrements en stimulant les différents muscles par vibration avec la même fréquence que celle enregistrée.

De cette manière, en 1995, Roll et al [19] ont réussi à induire chez un sujet dont la main ne bouge pas, la sensation qu'elle dessine un carré, un rectangle, une ellipse ou un cercle en fonction de « patrons » de stimulation spécifiques à chacune des formes géométriques. Cette expérience a été réalisée grâce à plusieurs vibrations, appliquées au niveau du poignet.

Grâce à quatre vibreurs appliqués sur les muscles du coude et de l'épaule, il a également été possible de simuler la sensation d'écriture de lettres, de chiffres ou de mots courts [19] (cf figure 20). Les sujets étaient capables de

reconnaître et de définir le symbole perçu puis de le dessiner avec fidélité.

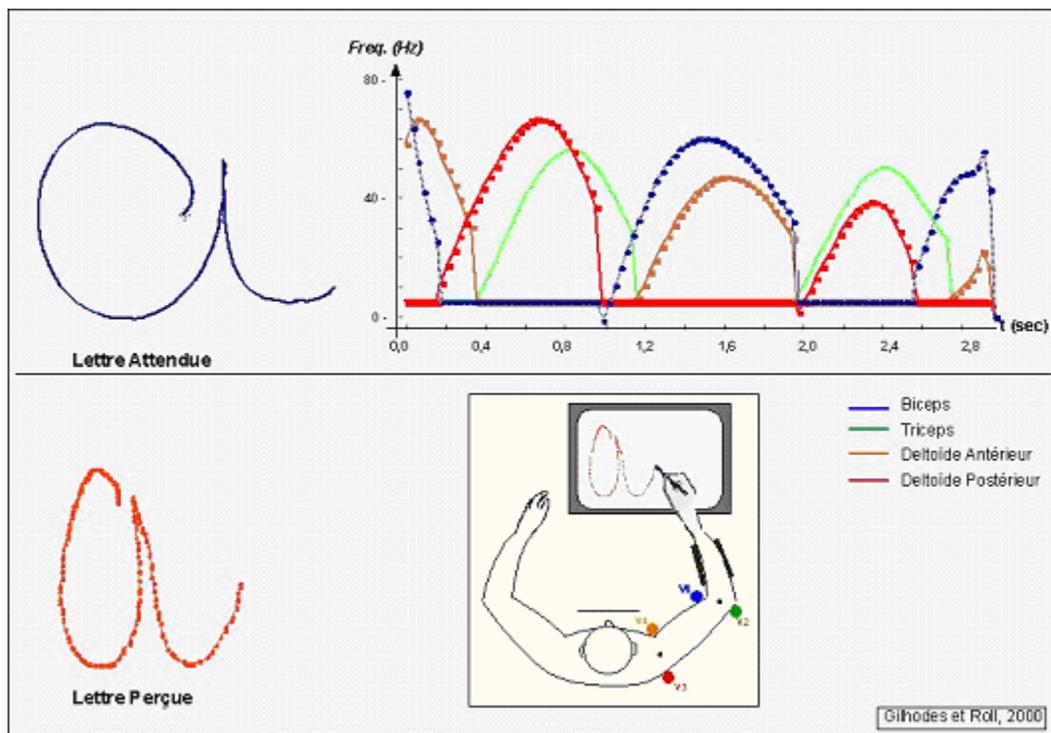


FIG. 20 – Illusion d'écriture de la lettre a (Source : [19])

Plus récemment, cette technique a également été appliquée avec succès à la cheville [20].

Influence des récepteurs cutanés Il a été prouvé que les récepteurs cutanés de la peau avaient un rôle dans les sensations kinesthésiques. En effet, le simple fait de stimuler ces récepteurs par un étirement de la peau permet d'évoquer une illusion de mouvement chez certains sujets (environ 56%) [7]. Mais cette technique à elle seule, a des résultats nettement moins bons que la technique par vibration.

Etant donné que cette technique de stimulation stimule des récepteurs qui sont différents des récepteurs utilisés par les autres techniques, Collins et al [8] ont eu l'idée de combiner l'étirement de la peau à une autre technique de stimulation afin d'obtenir de meilleurs résultats. Leurs expériences effectuées à différents endroits du corps ont permis de montrer que la combinaison d'un étirement de la peau à une vibration sur les tendons augmente considérablement l'amplitude des mouvements ressentis (plus du double dans certains cas, comme pour le coude). On peut en conclure que la stimulation des récepteurs de la peau n'est pas à exclure de la simulation kinesthésique et que peut-être, une stimulation kinesthésique et une stimulation tactile peuvent être combinées.

3.2.3 Perspectives pour la réalité virtuelle

Actuellement, la simulation kinesthésique n'a pas d'applications concrètes en réalité virtuelle étant donné qu'elle n'en est encore qu'au stade expérimental en médecine. Cependant, dans les articles récents de recherche dans ce domaine (neurobiologie, neurologie), certaines perspectives d'applications commencent à évoquer la réalité virtuelle. Par exemple, Roll et al [20] concluent en disant que les résultats obtenus incitent à utiliser l'illusion de mouvement induite par vibration comme un outil dans les domaines de l'apprentissage moteur, la rééducation et la réalité virtuelle.

L'utilisation de l'illusion de mouvement pourrait permettre des applications très novatrices. Premièrement, on pourrait simplement faire ressentir à un sujet un déplacement imposé dans un monde virtuel. Dans un univers où le déplacement de l'utilisateur est imposé, l'utilisateur pourrait avoir l'impression de marcher lors du déplacement, au lieu d'avoir un simple mouvement de caméra pour restituer le déplacement. Deuxièmement, il serait intéressant de coupler cette illusion de mouvement avec les récentes techniques d'interaction par électromyogramme. L'électromyogramme est l'enregistrement de l'activité électrique dans le corps lors de la contraction des muscles. Cette technique peut être utilisée pour interagir avec un monde virtuel en enregistrant les contractions de certains muscles et en les reproduisant sur l'avatar dans le monde virtuel. En effet, une interface utilisant l'électromyogramme a été récemment implémentée dans un CAVE par les chercheurs de l'université de Tokyo [21]. Elle permet d'interagir et de naviguer dans le monde virtuel grâce à la détection des contractions musculaires. On peut penser qu'en se développant, cette technique va devenir très intuitive : pour marcher dans le monde virtuel, il suffira de contracter les muscles des jambes.

On peut imaginer qu'un sujet immobilisé dans le monde réel pourrait bouger dans le monde virtuel par une interface d'interaction utilisant l'électromyogramme et ressentir ses mouvements par une illusion de mouvement. Cela permet d'introduire un ordinateur entre la contraction musculaire effectuée et le mouvement perçu. Il serait alors possible de réguler la corrélation entre les deux selon les données du monde virtuel. Par exemple, si le bras du sujet porte un objet du monde virtuel, il faudra une contraction beaucoup plus forte que s'il ne portait rien pour réaliser le même mouvement. On pourrait, peut-être, ainsi simuler un changement de gravité pour une application se déroulant dans un milieu avec une faible pesanteur où l'action de marcher nécessite beaucoup moins d'effort.

4 Conclusion

La simulation sensorielle est un des axes de recherche pour l'amélioration des dispositifs d'immersion dans les mondes virtuels. L'état des connaissances actuelles dans le domaine médical permet d'envisager des solutions de simulation sensorielle pour la réalité virtuelle, en particulier pour le toucher et pour la proprioception.

Concernant la simulation du toucher, on a pu voir qu'il existait de nombreux dispositifs dans le domaine médical utilisant la stimulation électrotactile, qui semble être le mode de stimulation tactile le plus performant pour l'instant. Des dispositifs d'interaction basés sur cette technique commencent également à voir le jour en réalité virtuelle. Ces dispositifs sont décrits sur le plan matériel mais la partie logicielle ne semble pas être avoir été traitée de façon formelle. On peut penser que des couches logiciels vont être nécessaires pour faire le lien entre les informations tactiles du monde virtuel et le mode de stimulation des différentes électrodes. En conséquence, il n'existe pas encore d'applications concrètes simulant le sens du toucher pour la réalité virtuelle, comme un monde où l'on peut toucher les différents objets et ressentir leur forme et leur texture. Mais une application de ce genre semble être réalisable avec les connaissances actuelles. Elle pourrait permettre d'obtenir un dispositif de restitution tactile beaucoup plus général (capable de restituer différents types de sensations) et aussi peu encombrant.

Concernant la simulation de la proprioception, le cas du sens vestibulaire semble être un bon exemple des avantages que peuvent apporter une simulation sensorielle. En effet, déjà bien maîtrisée dans le domaine médical, la stimulation galvanique vestibulaire est aujourd'hui utilisée dans le domaine de la réalité virtuelle afin de modifier l'équilibre et de simuler les accélérations latérales. Grâce à cette solution, un simple casque pourrait remplacer les différents dispositifs mécaniques, qui sont à la fois très chers et très encombrants. Vu le faible investissement que représente ce dispositif, on peut penser qu'après quelques améliorations, cette technique va très vite s'étendre à de nombreuses applications.

Du côté du sens kinesthésique, même si il n'existe pas encore de dispositif ou d'application utilisant la simulation sensorielle en réalité virtuelle, on peut penser que les récentes découvertes dans le domaine médical laissent envisager des possibilités. En effet, les différents chercheurs en neurobiologie et neurologie sont aujourd'hui capables de créer une illusion de mouvement pour les différents segments du corps humain, en particulier grâce à l'utilisation de vibrations sur les tendons. On peut penser que l'implémentation de ces techniques en réalité virtuelle pourrait permettre des restitutions du style retour d'effort, sensation de mouvement lors de déplacements imposés, ou même la restitution des caractéristiques physiques du monde virtuel (par exemple, déplacement sur un sol en pente, modification de la gravité,...).

Enfin, on est encore très loin du cas, où juste des électrodes branchées sur le corps suffisent pour restituer toutes les sensations, mais on peut penser que dans un futur lointain on sera, peut-être, capable de simuler toutes les sens comme on commence à savoir le faire pour le toucher et pour la proprioception. Il sera, peut-être, possible de stimuler le nerf optique, par exemple, et ainsi simuler des images sans dispositif de visualisation. Cela permettrait, non seulement, d'aider des personnes handicapées en simulant leur sens défaillant, mais surtout cela pourrait permettre d'augmenter considérablement le réalisme des applications en réalité virtuelle.

Références

- [1] *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 2ème edition, 2000.
- [2] <http://spiral.univ-lyon1.fr/polycops/NeuroInterFac/NeuroInterFac-3.6.html>. Neurologie Inter-Facultés, 2001-2002.
- [3] http://cogimage.dsi.cnrs.fr/equipes/pmb/pmb_themes.htm. Laboratoire de neurosciences cognitives & Imagerie Cérébrale, Dec 2006.
- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Peau>. Wikipédia, Dec 2006.
- [5] <http://neurobranches.chez-alice.fr/systneru/systsens/somesthesie2.html>. Site des Neurobranchés, Dec 2006.
- [6] <http://www.sante.cc/stress/articles/stressmusc/equip senso.htm>. www.sante.cc, Dec 2006.
- [7] D. F. Collins and A. Prochazka. Movement illusions evoked by ensemble cutaneous input from the dorsum of the human hand. *Journal of Physiology*, 496(3) :857–871, 1996.
- [8] D. F. Collins, K. M. Refshauge, G. Todd, and S. C. Gandevia. Cutaneous receptors contribute to kinesthesia at the index finger, elbow, knee. *Journal of Neurophysiology*, 94 :1699–1706, Sept 2005.
- [9] S. C. Gandevia. Illusory movements produced by electrical stimulation of low-threshold muscle afferents from the hand. *Brain*, 108(4) :965–981, Dec 1985.
- [10] K. A. Kaczmarek. Tactile display research group. In *RESNA Conference*, 2002.
- [11] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach-y-Rita, and W. J. Tompkins. Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems. *IEEE Trans. Biomed Eng.*, 38(1) :1–16, Janv 1991.
- [12] H. Kajimoto, M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi. SmartTouch - Augmentation of skin sensation with electrocutaneous display. In *Proc. of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, pages 40–46, 2003.
- [13] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi. Tactile feeling display using functional electrical stimulation. In *Proc. of The 9th Int. Conf. on Artificial reality and Telexistence*, pages 107–114, Dec 1999. <http://www.ic-at.org>.
- [14] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi. Electro-tactile display with force feedback. In *Proc. of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics(SCI2001)*, volume XI, pages 95–99, Orlando, July 2001.
- [15] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi. Electrocutaneous display as an interface to a virtual tactile world. In *Proc. of the IEEE Virtual Reality Conf. (VR'01)*, pages 289–290, Mar 2001.

- [16] T. Maeda, H. Ando, T. Amemiya, N. Nagaya, M. Sugimoto, and M. Inami. Shaking the world : Galvanic vestibular stimulation as a novel sensation interface. In *Proc. of the 32th Int. Conf. on Computer Graphics and Interactive techniques (SIGGRAPH2005)*, Aug 2005.
- [17] T. Maeda, H. Ando, and M. Sugimoto. Virtual acceleration with galvanic vestibular stimulation in a virtual reality environment. In *Proc. of the IEEE Virtual Reality Conf. (VR'05)*, pages 289–290, Bonn, Germany, Mar 2005.
- [18] Y. Oktay, L. Junhun, L. Beom-Chan, and R. Jeha. Tactile sensation display with electrotactile interface. In *Int. Conf. on Control, Automation and Systems (ICCAS2005)*, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea, June 2005.
- [19] J.-P. Roll, F. Albert, M. Bergenheim, and E. Ribot-Ciscar. La main écrit sur le papier et... sur le cerveau. In *Colloque Ecriture*, Aix-en-Provence, May 2003. <http://www.up.univ-mrs.fr/wpsycle/ColloqueEcriture/doccerveau/roll.html>.
- [20] J.-P. Roll, F. Albert, M. Bergenheim, and E. Ribot-Ciscar. The Ia afferent feedback of a given movement evokes the illusion of the same movement when returned to the subject via muscle tendon vibration. *Exp Brain Res*, 172 :163–174, June 2006.
- [21] H. Touyama, K. Hirota, and M. Hirose. Implementation of electromyogram interface in CABIN immersive multiscreen display. In *Proc. of the IEEE Virtual Reality Conf. (VR'06)*, pages 273–278, Los Alamitos, CA, USA, 2006.