

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/255645398>

Suppléance perceptive, immersion et informations proprioceptives

ARTICLE · DECEMBER 2005

CITATION

1

READS

25

4 AUTHORS, INCLUDING:



[Malika Auvray](#)

French National Centre for Scientific Resea...

46 PUBLICATIONS 636 CITATIONS

SEE PROFILE



[Charles Lenay](#)

Université de Technologie de Compiègne

93 PUBLICATIONS 576 CITATIONS

SEE PROFILE

Suppléance perceptive, immersion et informations proprioceptives

Malika Auvray¹, Charles Lenay², J. Kevin O'Regan³, et Julien Lefèvre⁴

¹ Laboratoire de Psychologie Expérimentale, Université René Descartes, Paris, France, malika.auvray@univ-paris5.fr

² COSTECH, Université de Technologie de Compiègne, France, charles.lenay@utc.fr

³ Laboratoire de Psychologie Expérimentale, Université René Descartes, CNRS, Paris, France, oregan@ext.jussieu.fr

⁴ Ecole Polytechnique, Paris, France, julien.lefevre@polytechnique.org

Résumé

A l'aide d'un dispositif technique original de suppléance perceptive, nous nous proposons d'étudier de façon expérimentale une forme de " proprioception prothétisée ". En effet, les prothèses qui transforment l'activité perceptive (substitution sensorielle, téléprésence, réalité virtuelle, suppléance ...) posent les problèmes de leur appropriation (adaptation à leur fonctionnement) et de l'immersion dans un espace modifié. Ces problèmes nous semblent liés à celui de la connaissance, par l'agent, de ses propres actions. Nous voulons explorer ici différentes modalités d'accès du sujet à ses actions et évaluer dans quelle mesure cet accès facilite à la fois l'exploration des scènes, la localisation spatiale des objets et la reconnaissance de forme.

Mots clé : Suppléance perceptive, substitution sensorielle, proprioception, perception, prothèse, immersion.

1. Introduction

1.1. Proprioception et immersion

Le problème de la proprioception se pose, dans le cadre des interfaces, en lien avec la question de l'immersion. Ce que nous appelons classiquement « immersion » signifie simplement être à un monde d'action et de perception nouveau, rendu possible par un dispositif technique. Être immergé dans un espace signifie localiser objets et événements relativement à un point de vue appartenant à cet espace. Par exemple, nous sommes immergés dans un jeu vidéo si c'est bien par rapport au personnage (avatar) qui nous représente que nous réalisons des actions et localisons les obstacles ou objectifs. Nous oublions ainsi que nous sommes en train de manipuler un joystick, une manette ou les touches d'un clavier au profit de l'impression d'avancer, tourner, sauter dans l'espace du jeu. De même, l'appropriation d'une prothèse, c'est-à-dire d'un dispositif technique de couplage avec l'environnement (canne, voiture, dispositif de substitution sensorielle...) n'est réussie que si nous devenons capable de percevoir et d'agir dans l'espace de possibles défini par ce dispositif. Par exemple, une personne non-voyante utilisant une canne, parvient à expérimenter la stimulation au bout de la canne, plutôt que dans la main, là où elle se produit. Ainsi, l'utilisateur touche et pousse un objet au bout de la canne et oublie le contact de son manche avec la main.

Lors de la conduite d'une voiture, nous sentons les gravillons sous les roues et non des vibrations sur le volant ou le fauteuil ; nous prenons un virage et oublions que nous tournons un volant.

Afin de décrire ce phénomène de l'immersion et de comprendre les conditions de son advenue, il est utile de distinguer entre ce que « l'on fait » et ce que « l'on y fait ». En effet, les multiples médiations techniques présentes dans notre environnement, comme les divers systèmes de réalité virtuelle, tendent à toujours augmenter l'écart entre d'une part, ce que l'on fait corporellement et qui est susceptible d'un savoir proprioceptif (serrer un bâton, déplacer la souris d'un ordinateur, tourner un volant...), et d'autre part, ce que l'on fait dans l'espace de possibles nouveaux défini par le dispositif. Ceci, que ce soit un espace numérique simulé (réalité virtuelle) ou un espace d'action concrète (outil ou substitution sensorielle). Ce que « l'on y fait » est essentiellement caractérisé comme déplacements du point de vue relativement aux objets que le dispositif rend accessibles ou comme actions de modification de ces objets. La clé de l'immersion est d'oublier ce que je fais au profit de ce que j'y fais. Notre question est dès lors, quelles sont les conditions pour que ce transfert se réalise ? Comment sais-je ce que j'y fais ? Les connaissances proprioceptives naturelles suffisent-elles pour rendre transparente la médiation avec l'environnement simulé ?

1.2. Proprioception et réalité virtuelle

Les environnements de réalité virtuelle et particulièrement les jeux vidéos sont appropriés afin d'illustrer cette question. L'utilisateur d'un jeu vidéo est physiquement présent dans un monde et virtuellement présent dans un autre. Si l'immersion était totale (en terme de données sensorielles), il ne percevrait que des stimuli émanant du monde simulé. Mais, ne serait-ce que pour des raisons technologiques, ceci n'est pas envisageable actuellement. L'immersion reste partielle et ne concerne que les sens majeurs : la vue et l'ouïe essentiellement. Le sens proprioceptif en particulier n'est pas pris en compte. Un problème cognitif en situation de réalité virtuelle est celui de la possible incohérence de l'ensemble des stimulations reçues par l'utilisateur. Si les mouvements dans l'espace simulé sont discordants avec les mouvements corporels effectués pour les commander, l'information proprioceptive naturelle entrera en conflit avec les données du système de réalité virtuelle. Dans le jeu vidéo, les informations proprioceptives perçues par le joueur correspondent à la manipulation du joystick, alors que d'après l'environnement du jeu, elles devraient provenir de mouvements des bras ou des jambes. Ou encore, il y a incohérence entre la perception visuelle d'un coup qui a atteint son objectif et l'intéroception correspondante de la victime : la douleur provoquée est en général redirigée vers les modalités visuelles et/ou sonores. En général, malgré ces incohérences, nous sommes capables de gérer ces perceptions de manière pertinente. Ceci car la richesse des informations extéroceptives fournies par le retour visuel permet de compenser l'absence de savoir proprioceptif dans l'espace du jeu.

1.3. Proprioception et suppléance perceptive

Cependant, dans le cadre d'autres interfaces, comme les systèmes de substitution sensorielle, le décalage des informations proprioceptives entre l'environnement réel et l'environnement simulé est plus problématique. Pour les décrire, les dispositifs de substitution sensorielle, encore appelés dispositifs de suppléance perceptive (Lenay et al., 2000) sont des prothèses développées pour l'aide aux personnes non-voyantes, depuis la fin des années 60 (Bachy-Rita, 1969 ; Kay, 1964). Ces dispositifs permettent à des informations venant d'un récepteur artificiel d'être traitées par un organe sensoriel inhabituel pour de telles informations. Par exemple, ils peuvent permettre à des stimuli visuels d'être codés afin d'être traités par le système auditif ou somesthétique. Les dispositifs traduisent une image visuelle, souvent captée par une caméra vidéo,

en une stimulation auditive (Meijer, 1992 ; Cronly-Dillon et al., 1999 ; Capelle et al., 1998) ou en une stimulation électrique ou vibrotactile appliquée sur une partie de la peau (Bach-y-Rita, 1972, 1994 ; Kaczmarek, 1995). Ces systèmes permettent d'effectuer de nombreuses tâches perceptives, comme la reconnaissance de formes (Kaczmarek et Haase, 2003 a&b ; Sampaio et al., 2001 ; Arno et al., 1999, 2001 ; Cronly-Dillon et al., 1999, 2000 ; Auvray et al., 2003), la lecture (Bliss, 1978 ; Craig, 1976, 1981 ; Loomis, 1974, 1980), ou encore la localisation (Janson, 1983 ; Lemaire, 2002).

Les dispositifs de suppléance perceptive semblent particulièrement indiqués pour étudier les conditions d'accès à ses actions et ce, pour plusieurs raisons. En premier lieu, les technologies de suppléance perceptive permettent une étude de la genèse perceptive. Elles nous permettent de montrer la nécessité du mouvement, de l'engagement de l'utilisateur pour qu'un processus de constitution perceptive via l'interface soit effectif. En second lieu, dans beaucoup de dispositifs étudiés, les retours sensoriels délivrés ne donnent pas accès à l'intégralité de la forme, mais ils sont délivrés pour contraindre le couplage et favoriser les invariances. En troisième lieu, ces technologies ne mobilisent pas le retour d'effort, par conséquent, la loi de couplage relative aux objets ne peut pas être définie par les résistances de l'espace exploré, ou des objets dans l'espace exploré. Ceci fait que l'utilisateur va devoir constituer le guidage de son activité. Et c'est au travers de cette activité qu'il pourra avoir accès à la fois à son geste et aux effets de son geste.

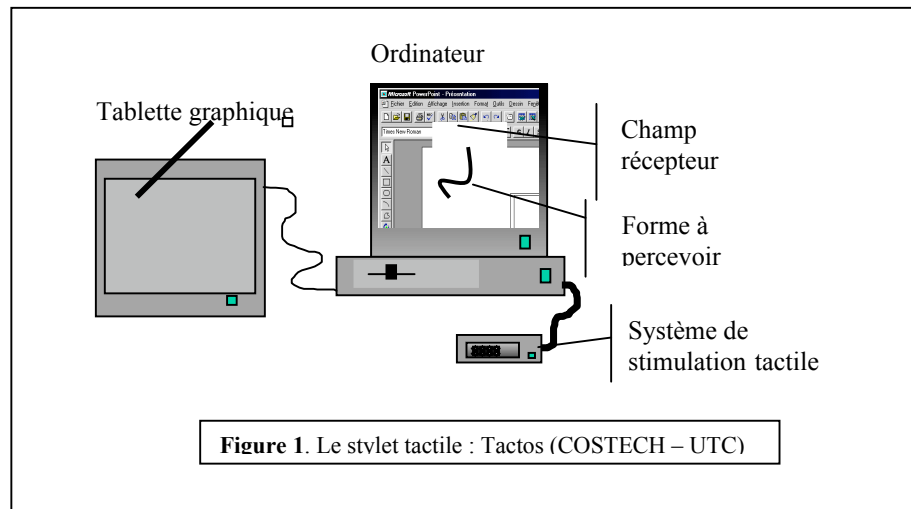
1.4. Proprioception et suppléance perceptive : l'exemple d'un dispositif minimaliste

Les dispositifs de suppléance perceptive minimalistes sont particulièrement adaptés à l'étude des conditions d'accès à ses actions dans un espace distinct de l'espace corporel naturel. Lors de l'utilisation de tels dispositifs, nous ne pouvons plus, comme avec un jeu vidéo compter sur la vision de l'espace numérique pour savoir ce que l'on y fait. Les sujets se sentent donc souvent perdus, ramenés à une manipulation incohérente du dispositif, et son appropriation échoue. Il nous semble que bien comprendre les conditions de la réussite de l'immersion dans cette situation extrême devrait être porteur de leçons générale pour les conditions d'appropriation de tout outil ou système de réalité virtuelle.

La question du savoir de ses actions s'est posée avec une particulière acuité concernant le dispositif de suppléance perceptive « Tactos ». Ce logiciel, développé par le groupe Suppléance Perceptive, unité de recherche COSTECH, Université de Technologie de Compiègne est un moteur de réalité virtuelle destiné aux non-voyants. Il permet de contrôler les stimulations sensorielles du sujet (stimuli tactiles, sonores ou visuels) en fonction des mouvements de champs récepteurs qu'il peut commander avec n'importe quel effecteur (souris, stylet, capteurs de mouvement,...). Les formes explorées sont des formes vectorielles. Les champs récepteurs peuvent prendre toute sorte de formes combinant des cercles.

Le dispositif est constitué du stylet d'une tablette graphique (ou d'une souris) relié à une matrice de stimulateurs tactiles par l'intermédiaire d'un système informatique (voir Figure 1). Le sujet explore avec le stylet la surface de la tablette graphique et reçoit des stimulations tactiles sur sa main libre, variant en fonction des formes rencontrées. Plus précisément, le déplacement du stylet sur la tablette graphique détermine le déplacement d'un curseur dans l'espace bidimensionnel d'une image en noir et blanc affichée sur l'écran de l'ordinateur.

Le curseur correspond à une matrice de champs récepteurs virtuels, c'est-à-dire fixés spatialement relativement aux mouvements du stylet de la tablette graphique. Lorsque le champ récepteur croise au moins un pixel noir, il déclenche l'activation d'une stimulation tactile sur la main libre du sujet (stimulation qui consiste en un déplacement d'un picot sur une cellule de barrette braille électronique).



Avec ce dispositif expérimental, l'entrée sensorielle sur les données du monde virtuel (les formes en noir et blanc sur l'écran) sont extrêmement réduites. Dans une situation limite, l'utilisateur (aveugle ou voyant les yeux bandés) est réduit à commander les déplacements d'un unique petit champ récepteur dans l'espace bidimensionnel de l'écran. Il ne reçoit donc qu'une information en tout ou rien : une stimulation tactile si le champ récepteur recouvre au moins un pixel noir ; absence de stimulation tactile si tous les pixels sont blancs. Comme nous l'avons montré par de nombreuses expériences, même dans cette condition limite, l'utilisateur se révèle capable de résoudre des tâches perceptives simples (Hanneton et al., 1999). Mais, puisque l'entrée sensorielle est réduite au maximum, c'est seulement par son activité exploratoire qu'il peut localiser et reconnaître des formes (Lenay et al., 1997, 2002). Nous pouvons dire alors que le dispositif force une extériorisation maximale de l'activité perceptive, c'est-à-dire son déploiement spatial et temporel qui permet une étude systématique de la dynamique des trajectoires perceptives et des stratégies qui les produisent.



Figure 2. Trajectoires perceptives enregistrées lors de la reconnaissance d'un P ou d'un S avec un seul champ récepteur. La courbe devient rouge Lorsqu'il y a contact entre le champ récepteur et la forme présente sur l'écran.

Ici, savoir ce que l'on fait dans l'espace des formes à percevoir est bien crucial puisque c'est seulement à partir de ce savoir que pourront être localisées ou reconnues des formes.

Or, non seulement les capacités des sujets à reconnaître des formes un peu complexes sont très limitées, mais on observe souvent qu'ils se perdent dans cet espace (voir Figure 2). Dès que l'accroche avec la ligne est perdue, le sujet se révèle pratiquement incapable de la retrouver ou de comprendre quelle action il venait d'effectuer et où il se trouve maintenant.

2. Expérience 1

2.1. Objectif des études présentées

Les dispositifs de suppléance perceptive minimalistes ont posé le problème du savoir de ses actions et ont notamment souligné la faiblesse de la proprioception naturelle via ce couplage. Nous proposons que deux types de solutions peuvent être envisagées. Soit nous enrichissons les données sensorielles « extéroceptives » associées aux formes présentes en proposant des champs récepteurs plus complexes. Soit nous proposons des données sensorielles « proprioceptives » directement associées aux mouvements effectués.

2.2. Méthode Générale

2.2.1. Appareillage

Le stylet tactile

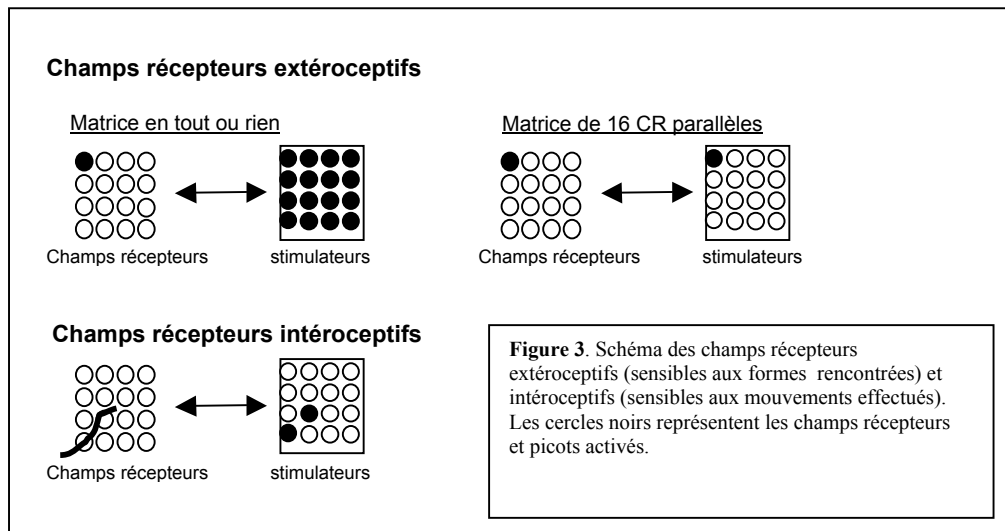
Nous utilisons le logiciel « Tactos II », décrit précédemment, développé par le groupe Suppléance Perceptive, unité de recherche COSTECH, Université de Technologie de Compiègne. Ce logiciel a été modifié de telle sorte qu'il puisse donner accès à la fois à des informations extéroceptives et à des informations proprioceptives.

Les champs récepteurs

Les champs récepteurs extéroceptifs : Nous utilisons une matrice de 16 champs récepteurs, d'une surface de 16 pixels chacun qui se déplacent ensemble et sont organisés en carré. Afin d'étudier l'influence du parallélisme des champs récepteurs sur les performances des sujets, nous testons 2 champs récepteurs extéroceptifs différents : un champ récepteur « mono », ce champ récepteur ne commande qu'une stimulation en tout ou rien des 16 picots brailles. Et un champ récepteur 16 correspondant respectivement à 16 picots brailles électroniques activés indépendamment (voir Figure 3).

Les informations proprioceptives : Nous utilisons une matrice de 16 champs récepteurs, d'une surface de 16 pixels chacun qui se déplacent ensemble et sont organisés en carré. Ces déplacements génèrent une trace à partir du centre du carré, trace dont la rencontre avec un des champs récepteurs commande une stimulation sensorielle spécifique des picots de la matrice de stimulateurs tactiles. Ainsi par exemple, si nous déplaçons le stylet en haut à gauche, les picots en bas à droite de la matrice vont s'activer. Ces champs récepteurs ne sont sensibles qu'à la trace générée par le mouvement et non pas aux formes présentes dans l'environnement virtuel. Les stimulations tactiles sont donc distribuées sur une matrice de picots braille différente de celle dédiée aux champs récepteurs extéroceptifs. D'un point de vue pratique, l'extrémité du majeur est en contact avec les 16 picots commandés par la matrice des champs récepteurs proprioceptifs, et le bout de l'index est en contact avec les 16 picots commandés par la matrice de champs récepteurs extéroceptifs.

Notons que la trace produite par les mouvements des champs récepteurs s'évanouit progressivement à partir de son extrémité, ce qui permet de représenter la dégradation rapide de la mémoire proprioceptive. Le délai entre la production de la trace et le retour sensoriel permet d'une part, de rendre compte de la dérive proprioceptive, c'est-à-dire ici l'absence de perception de mouvements trop lents, et d'autre part, de rendre possible l'accès à une forme de vitesse du geste.



Les effecteurs

Ces expériences ont été réalisées avec deux effecteurs différents : une tablette graphique et une souris, correspondant à une richesse décroissante des connaissances proprioceptives naturelles des déplacements effectués. En effet, avec le stylet, le codage des commandes des actions du curseur est un codage en « positions » : il y a une bijection entre l'espace de la tablette graphique et l'espace de l'écran, à chaque position du stylet sur la tablette correspond une seule position des champs récepteurs sur l'écran. Dans le cas de la souris il s'agit plutôt d'un codage en « déplacements » : les déplacements de la souris commandent des déplacements équivalents du curseur sur l'écran, indépendamment de la position de la souris. Dans ce cas, il ne peut y avoir de connaissance proprioceptive de la position des champs récepteurs.

2.2.2. Tâches

Nous étudions l'influence d'une prothétisation des informations proprioceptives et du parallélisme de la stimulation à travers trois tâches : prolongement de mouvement, production de formes semblables, exploration et reproduction de formes.

2.2.3. Participants

16 sujets voyants participent à ces expériences. Tous sont droitiers. Aucun participant n'était familier avec le dispositif Tactos. Les sujets n'ont reçu ni rémunération ni points de cours pour leur participation. Chaque participant a effectué deux sessions d'évaluation. Chaque session dure en moyenne 1h30.

2.2.4. Plan expérimental

16 sujets passent les 3 séries d'expériences. Chaque sujet effectue 2 sessions, une avec proprioception et une sans proprioception. 8 sujets passent les expériences avec le stylet tactile et 8 avec la souris. Pour chaque condition d'effecteur, 4 sujets passent les séries d'expériences avec le champ récepteur extéroceptif mono et 4 sujets avec le champ récepteur extéroceptif 16. L'ordre de passation des conditions avec et sans proprioception est contrebalancé : la moitié des sujets passent d'abord la session avec proprioception et l'autre moitié des sujets commence par la session sans proprioception.

Le plan expérimental est le suivant : $S_2 < E_2 * CR_2 * O_2 > P_2$

Où S est le facteur aléatoire sujet, et où les facteurs principaux systématiques sont :

- E : Effecteur ; E_1 : stylet, E_2 : souris
- CR : Champ récepteur ; CR_1 : champ récepteur 16, CR_2 : champ récepteur 1
- O : Ordre de passation des séances : O_1 : commencent sans proprioception, O_2 : commencent avec proprioception
- P : Informations proprioceptives ; P_1 : sans proprioception, P_2 : avec proprioception

2.2.5. Procédure

Les sujets, assis en face d'une table, portent un bandeau noir sur les yeux. Ils tiennent dans la main droite l'un des deux effecteurs choisis pour cette expérience : une souris optique (Labtec, 400 dpi) ou le stylet d'une tablette graphique (Wacom Intuos2 9*12). Ils ont l'index de la main gauche sur une matrice de stimulateurs vibrotactiles sensibles aux formes rencontrées. Dans la session avec proprioception, ils ont le majeur de la main gauche sur une matrice de stimulateurs vibrotactiles adjacente à la précédente, sensible aux mouvements qu'ils ont effectués. L'effecteur est connecté à un ordinateur personnel Sony PCG-FX401 dans lequel est hébergé le logiciel Tactos. Ce logiciel convertit les formes rencontrées et les mouvements du sujet en stimulations tactiles sur les matrices vibrotactiles.

Apprentissage

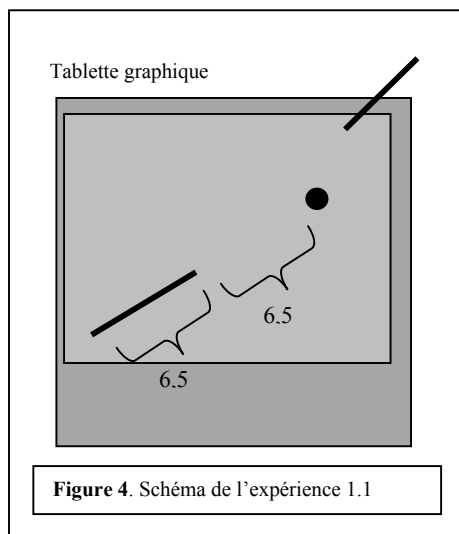
Nous donnons aux sujets une explication verbale du fonctionnement du dispositif. Nous leur expliquons la forme des champs récepteurs leur servant à explorer les formes à l'écran et la relation entre leur exploration et la stimulation sensorielle correspondante sur la matrice de stimulateurs vibrotactiles. Nous leur expliquons de même le principe des informations proprioceptives et la stimulation correspondante sur la seconde matrice de stimulateurs vibrotactiles.

Nous entraînons les sujets avec le dispositif. Avant la session P_1 , nous les entraînons avec le retour extéroceptif uniquement et avant la session P_2 , nous les entraînons avec les deux retours sensoriels. Nous demandons dans un premier temps aux sujets de parcourir deux segments de ligne en se concentrant sur les variations de stimulations des stimulateurs vibrotactiles. Puis, nous leur donnons deux pistes à parcourir. Le point de départ se fait sur le bord gauche de l'écran. Les sujets doivent parcourir des chemins simples, faits de 4 segments de 3 cm. Leur tâche est de trouver le chemin qui se finit par un cercle. La session d'apprentissage dure 20 mn.

2.3. Expérience 1.1- Prolongation de mouvement

2.3.1. Méthode

Le sujet doit parcourir 7 lignes d'orientations différentes, puis prolonger son mouvement « dans le vide » de sorte à trouver la cible se situant dans ce prolongement. Nous laissons au sujet 50 s. d'exploration de la ligne, puis le sujet doit revenir au début de la ligne, la suivre et prolonger son mouvement.



Les 7 orientations possibles de la ligne sont : 0° , 18° , 34° , 45° , 56° , 72° , 90° . Ces orientations correspondent à des vibrations déterminées sur la matrice de champs récepteurs proprioceptifs. La ligne mesure 6,5 cm et la distance entre la fin de la ligne et la cible est de 6,5 cm. La cible est un disque de 1 cm de rayon. Le point de départ de la ligne est situé en bas à gauche de la tablette décalé de 1×1 cm par rapport au bord de la tablette.

Nous mesurons le pourcentage de réussite de la tâche, c'est-à-dire le pourcentage de fois où la cible a été atteinte ainsi que la distance des trajectoires des sujets par rapport à la cible.

2.3.2. Résultats

Pourcentage de réussite

Nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) sur 2 (proprioception) * 2 (effecteur) * 2 (champs récepteurs) * 2 (ordre).

Comme le montre la figure 5, les sujets ont des performances légèrement meilleures avec proprioception (79.46 %) que sans proprioception (73.21%). Cet effet n'est pas significatif ($F < 1$).

Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur effecteur, ni du facteur champ récepteur, ni du facteur ordre ($F_s < 1$).

Nous n'observons pas de différences majeures en fonction des valeurs des angles explorés. Il ne semble donc pas y avoir d'orientations privilégiées dans la tâche de prolongement de direction.

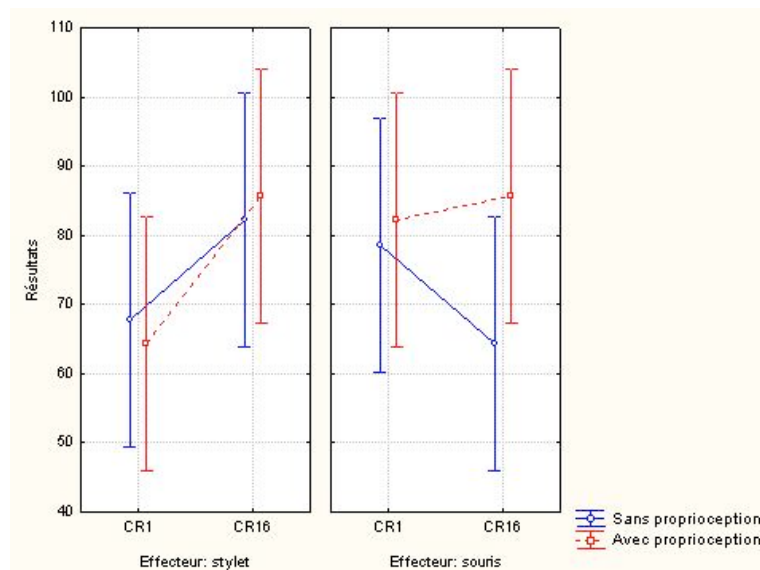


Figure 5. Expérience 1.1. Moyenne à travers les sujets du pourcentage de réussite de la tâche (atteindre la cible). Pour les conditions d'effecteur stylet et souris, pour les champs récepteurs 1 et 16 et pour les conditions avec proprioception et sans proprioception. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 0.95.

Distance au centre de la cible

Afin d'obtenir des résultats plus précis, nous évaluons les performances des sujets en fonction de leur écart par rapport à la cible. Pour cela nous mesurons la distance entre le centre de la cible et la position du sujet lorsqu'il est au plus proche de la cible.

Cette seconde mesure confirme les résultats obtenus précédemment. Les performances des sujets sont légèrement meilleures avec proprioception (0.98 cm) que sans proprioception (1.04 cm). Cet effet du facteur proprioception n'est pas significatif ($F < 1$).

2.4. Expérience 1.2

2.4.1. Méthode

Nous demandons aux sujets de dessiner 4 fois la même forme de la manière la plus similaire possible. Nous leur demandons d'effectuer cette tâche pour 3 formes composées de 2 segments et pour 3 formes composées de 3 segments. Nous mesurons l'erreur d'angle absolu, en degrés, dans la reproduction des dessins. Pour cela, nous calculons la variance des angles absolus dessinés par le sujet pour toutes les reproductions de l'angle d'un même segment.

2.4.2. Résultats

Nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) sur 2 (proprioception) * 2 (effecteur) * 2 (champs récepteurs) * 2 (ordre).

Comme le montre la figure 6, les sujets ont une variance légèrement plus importante sans proprioception (23.55) qu'avec proprioception (22.79). Cet effet n'est cependant pas significatif ($F < 1$).

Les résultats avec l'effecteur stylet (19.81) sont meilleurs qu'avec l'effecteur souris (26.54). L'effet du facteur effecteur n'est pas significatif ($F < 1$).

Les résultats avec le champ récepteur 16 (20.07) sont légèrement meilleurs qu'avec le champ récepteur 1 (23.54). Cet effet du facteur champ récepteur n'est pas significatif ($F < 1$). Nous n'observons pas d'effet du facteur ordre ($F < 1$).

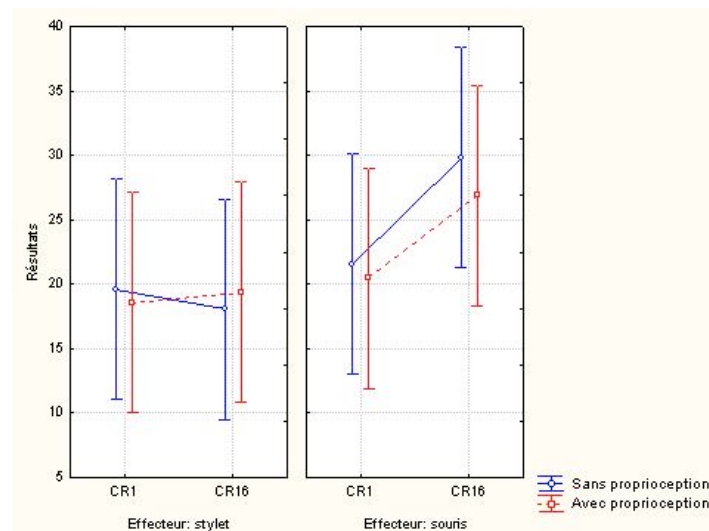


Figure 6. Expérience 1.2. Moyenne à travers les sujets de l'erreur moyenne d'angle absolu dans la reproduction des dessins. Pour les conditions d'effecteur stylet et souris, pour les champs récepteurs 1 et 16 et pour les conditions avec proprioception et sans proprioception. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 0.95.

2.5. Expérience 1.3

2.5.1. Méthode

Nous demandons aux sujets d'explorer et de redessiner 8 formes simples : 4 formes composées d'1 segment et 4 formes composées de 2 segments. Le sujet explore durant 1 mn 30 les formes composées d'un segment et durant 3 mn les formes composées de 2 segments. A la fin de l'exploration de chaque forme, nous demandons aux sujets de redessiner la forme explorée avec l'effecteur qu'il a utilisé pour l'exploration. Nous mesurons l'erreur d'angle absolu, en degrés, dans la reproduction des formes, par rapport aux angles des segments des formes parcourues.

2.5.2. Résultats

Nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) sur 2 (proprioception) * 2 (effecteur) * 2 (champs récepteurs) * 2 (ordre).

Nous n'observons pas d'effets significatifs du facteur proprioception ($F < 1$). Les sujets ont des performances légèrement meilleures avec proprioception (10.43) que sans proprioception (11.17).

Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur effecteur, ni du facteur champ récepteur, ni du facteur ordre ($F_s < 1$).

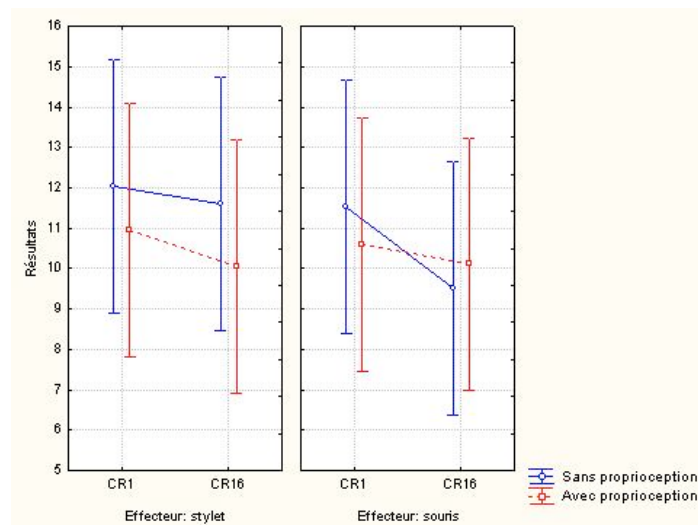


Figure 7. Expérience 1.3. Moyenne à travers les sujets de l'erreur moyenne d'angle absolu dans la reproduction des formes. Pour les conditions d'effecteur stylet et souris, pour les champs récepteurs 1 et 16 et pour les conditions avec proprioception et sans proprioception. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 0.95.

2.6. Discussion

Ces premiers résultats ne semblent pas permettre de tirer de conclusions définitives concernant l'influence des différents facteurs explorés. Nous pouvons néanmoins souligner certaines tendances. En premier lieu, à travers les trois tâches demandées aux sujets, nous notons une influence, bien que non significative, du facteur proprioception. Les performances des sujets sont légèrement meilleures avec proprioception que sans proprioception. Concernant le facteur effecteur, dans deux tâches sur les trois proposées, nous notons des performances légèrement meilleures avec le stylet qu'avec la souris. Concernant le facteur champ récepteur, deux tâches sur les trois proposées montrent des performances quelques peu supérieures avec le champ récepteur 16 qu'avec le champ récepteur mono. Nous ne notons pas d'influence de l'ordre dans lequel sont passées les deux sessions.

Perspectives

Lors de ces expériences, les sujets ont eu une session d'apprentissage du dispositif très restreinte. Il est par conséquent possible que l'absence d'influence des différents facteurs explorés soit due à une maîtrise insuffisante du dispositif. Nous décidons donc d'organiser une seconde série d'expériences permettant un plus grand temps d'apprentissage. Les sujets réalisent 3 séances comprenant de multiples tâches susceptibles de mobiliser un apprentissage de la proprioception prothésisée, séances réalisées à des jours différents.

Par ailleurs, dans la mesure où le stylet a donné des résultats légèrement meilleurs, nous décidons de travailler avec la souris. En effet, l'avantage du stylet tient très probablement à la meilleure association qu'il permet entre la proprioception naturelle et les mouvements effectués dans l'espace virtuel. Puisque dans cette expérience nous cherchons à comprendre comment suppléer artificiellement au manque de connaissance proprioceptive naturelle, l'effecteur souris devrait être plus révélateur. De plus, pour vérifier s'il y a bien un apprentissage de la fonction proprioceptive de nos dispositifs nous ajoutons une tâche de perception passive où les sujets devront reconnaître une trajectoire sur la seule base de la succession temporelle de stimuli tactiles.

3. Expérience 2

3.1. Objectif des études présentées

Les expériences effectuées précédemment ne nous ont pas permis de dégager un effet significatif de l'utilisation d'une proprioception prothétisée, ni un effet de l'utilisation de champs récepteurs parallèles. L'objectif des études que nous allons présenter à présent va être d'étudier si ces deux facteurs peuvent avoir une influence après un apprentissage beaucoup plus important du dispositif.

3.2. Méthode Générale

3.2.1. Appareillage

Le matériel est identique à celui utilisé dans l'expérience 1 à la seule différence que nous utilisons comme effecteur uniquement la souris.

3.2.2. Tâches

Nous étudions l'influence d'une prothétisation des informations proprioceptives et du parallélisme de la stimulation à travers un ensemble de 7 tâches nous permettant de dégager l'influence de ces facteurs sur des capacités variées telles que la capacité à ne pas se perdre et donc à mieux suivre une ligne ou une forme, qu'elles soient continues ou discontinues, la capacité à prolonger un mouvement, à retrouver une direction, la capacité à explorer et à reproduire des formes, ainsi que la capacité à comprendre des structures de changement (angles, arcs de cercles) et à les reproduire.

3.2.3. Participants

8 sujets voyants participent à ces expériences. Tous sont droitiers. Aucun participant n'était familier avec le dispositif Tactos. Les sujets n'ont reçu ni rémunération ni points de cours pour leur participation. Chaque participant a effectué une session d'apprentissage et deux sessions d'évaluation. Chaque session dure en moyenne 2h30.

3.2.4. Plan expérimental

8 sujets passent l'ensemble des expériences. Chaque sujet effectue une session d'apprentissage et 2 sessions d'évaluation : une avec proprioception et une sans proprioception. 4 sujets passent les séries d'expériences avec le champ récepteur extéroceptif mono et 4 sujets avec le champ récepteur extéroceptif 16. L'ordre de passation des conditions avec et sans proprioception est contrebalancé : la moitié des sujets passent d'abord la session avec proprioception et l'autre moitié des sujets commence par la session sans proprioception.

Le plan expérimental est le suivant : $S_2 < CR_2 * O_2 > P_2$

Où S est le facteur aléatoire sujet, et où les facteurs principaux systématiques sont :

- CR : Champ récepteur ; CR_1 : champ récepteur 16, CR_2 : champ récepteur 1

- O : Ordre de passation des séances : O₁ : commencent sans proprioception, O₂ : commencent avec proprioception
- P : Informations proprioceptives ; P₁ : sans proprioception, P₂ : avec proprioception

3.2.5. Procédure

Les sujets, assis en face d'une table, portent un bandeau noir sur les yeux. Ils tiennent dans la main droite une souris optique (Labtec, 400 dpi). Ils ont l'index de la main gauche sur une matrice de stimulateurs vibrotactiles sensibles aux formes rencontrées. Dans la session avec proprioception, ils ont le majeur de la main gauche sur une matrice de stimulateurs vibrotactiles adjacente à la précédente, sensible aux mouvements qu'ils ont effectués. La souris optique est connectée à un ordinateur personnel (Sony PCG-FX401) dans lequel est hébergé le logiciel Tactos, permettant de convertir les formes rencontrées et les mouvements du sujet en stimulations tactiles sur les matrices vibrotactiles.

Apprentissage

Nous donnons aux sujets une explication verbale du fonctionnement du dispositif. Nous leur expliquons la forme des champs récepteurs leur servant à explorer les formes à l'écran et la relation entre leur exploration et la stimulation sensorielle correspondante sur la matrice de stimulateurs vibrotactiles. Nous leur expliquons de même le principe des informations proprioceptives et la stimulation correspondante sur la seconde matrice de stimulateurs vibrotactiles.

Nous entraînons les sujets, lors d'une longue session dédiée, avec le dispositif. Nous leur faisons effectuer un ensemble de tâches leur permettant de se familiariser avec le champ récepteur dont ils se serviront lors des sessions d'évaluation, et leur permettant de se familiariser à la fois avec les informations extéroceptives et avec les informations proprioceptives.

3.3. Expérience 2.1

3.3.1. Méthode

Le sujet doit effectuer 3 allers-retours sur 3 lignes différentes. L'extrémité de chaque ligne est signalée par un signal sonore. Les lignes parcourues sont sélectionnées aléatoirement parmi 13 lignes de 9 cm d'orientations différentes allant de -90° à +90°. Nous mesurons le temps de parcours pour 3 allers-retours sur chaque ligne.

3.3.2. Résultats

Pour chaque expérience, nous effectuons une analyse de variance (ANOVA) sur 2 (proprioception) * 2 (champs récepteurs) * 2 (ordre).

Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur proprioception ($F < 1$). Les sujets ont des performances légèrement meilleures sans proprioception (91.7 s) qu'avec proprioception (113.9 s).

Les performances des sujets sont significativement affectées par le type de champ récepteur utilisé ($F(1,7)=16.56$, $p<0.001$). Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (71.6 s) qu'avec le champ récepteur 1 (134 s). Ce résultat est cohérent avec les travaux de N. Sribunruangrit sur l'influence du parallélisme des champs récepteurs (Sribunruangrit et al. 2004).

Les sujets qui commencent sans proprioception (85.1 s) ont de meilleurs résultats que les sujets qui commencent avec proprioception (119.9 s). Cet effet du facteur ordre n'est pas significatif ($F < 1$).

3.4. Expérience 2.2

3.4.1. Méthode

Le sujet doit effectuer 3 allers-retours sur 3 lignes en pointillé. Chaque ligne mesure 15 cm et est composée de 4 segments. Les extrémités de chaque ligne sont signalées par un signal sonore. Les extrémités de chaque segment sont signalées par un signal sonore différent. Les lignes parcourues sont sélectionnées aléatoirement parmi 13 lignes d'orientations différentes allant de -90° à $+90^\circ$. Nous mesurons le temps de parcours pour 3 allers-retours sur chaque ligne.



Figure 8. Expérience 2.2. Parcours de lignes en pointillé

3.4.2. Résultats

Les sujets ont des performances moins bonnes avec proprioception (216.6 s) que sans proprioception (183 s). Cet effet du facteur proprioception n'est pas significatif ($F < 1$).

Les performances sont significativement affectées par le type de champ récepteur utilisé ($F(1,7) = 80.1$, $p < 0.0001$). Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (130.8 s) qu'avec le champ récepteur 1 (268.6 s).

L'ordre dans lequel les sessions sont passées n'a pas d'influence sur les résultats ($F < 1$).

3.5. Expérience 2.3

3.5.1. Méthode

Cette expérience est similaire à l'expérience 1.1. Le sujet doit parcourir 7 lignes d'orientations différentes, puis prolonger son mouvement « dans le vide » de sorte à trouver la cible se situant dans ce prolongement. Nous laissons au sujet 50 s. d'exploration de la ligne, puis le sujet doit revenir au début de la ligne, la suivre et prolonger son mouvement. Les 7 orientations possibles de la ligne sont : 0° , 18° , 34° , 45° , 56° , 72° , 90° . Ces orientations correspondent à des vibrations déterminées sur la matrice de champs récepteurs intéroceptifs. La ligne mesure 6,5 cm et la distance entre la fin de la ligne et la cible est de 6,5 cm. La cible est un disque de 1 cm de rayon. Le point de départ de la ligne est situé en bas à gauche de la tablette décalé de 1*1 cm par rapport au bord de la tablette. Nous mesurons le pourcentage de réussite de la tâche, c'est-à-dire le pourcentage de fois où la cible a été atteinte.

3.5.2. Résultats

Les sujets ont des performances légèrement meilleures sans proprioception (80 %) qu'avec proprioception (69.6 %). Cet effet du facteur proprioception n'est cependant pas significatif ($F < 1$).

Les performances des sujets sont significativement affectées par le type de champ récepteur utilisé ($F(1,7) = 9.95$, $p < 0.005$). Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (87.5 %) qu'avec le champ récepteur 1 (62.5 %).

L'ordre dans lequel les sessions sont passées n'a pas d'influence sur les résultats ($F < 1$).

3.6. Expérience 2.4

3.6.1. Méthode

Afin d'étudier la capacité des sujets à retrouver une direction après s'en être écartée, et non pas simplement prolonger un mouvement, nous effectuons une tâche dans laquelle le matériel est équivalent au précédent à cette différence que le sujet doit effectuer un cercle avec la souris après avoir quitté la ligne et avant de retrouver la cible située dans le prolongement de la ligne. Les sujets effectuent 5 essais sur 5 lignes d'orientation différente. Nous mesurons le pourcentage de réussite de la tâche, c'est-à-dire le pourcentage de fois où la cible a été atteinte.

3.6.2. Résultats

Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur proprioception ($F < 1$). Les sujets ont des performances légèrement meilleures avec proprioception (67.5 %) que sans proprioception (65 %).

Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (72.5 %) qu'avec le champ récepteur 1 (60 %). Cette différence n'est pas significative ($F < 1$).

Les sujets qui commencent sans proprioception (70 %) ont de meilleurs résultats que les sujets qui commencent avec proprioception (62.5 %). Cet effet du facteur ordre n'est pas significatif ($F < 1$).

3.7. Expérience 2.5

3.7.1. Méthode

Les sujets doivent parcourir 3 fois un chemin fait de 4 segments en pointillé. La somme des 4 segments est de 15 cm. Les extrémités de chaque chemin sont signalées par un signal sonore. Les extrémités de chaque segment sont signalées par un signal sonore différent. Les sujets doivent ensuite redessiner la forme. Les sujets effectuent cette expérience sur 3 chemins différents. Nous mesurons le temps pour effectuer les 3 parcours de cette forme ainsi que l'erreur angulaire absolue des segments de la forme redessinée.

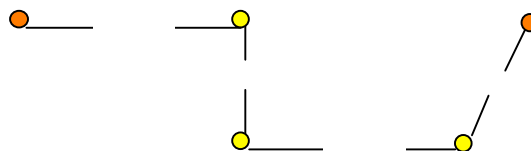


Figure 9. Expérience 2.5. Parcours de chemins en pointillé

3.7.2. Résultats

Temps de parcours

Les sujets ont des performances moins bonnes avec proprioception (345.5 s) que sans proprioception (270.1 s). Cet effet n'est pas significatif ($F < 1$).

Les performances sont significativement affectées par le type de champ récepteur utilisé ($F(1,7) = 25.59$, $p < 0.0001$). Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (250.1 s) qu'avec le champ récepteur 1 (372.0 s).

L'ordre dans lequel les sessions sont passées n'a pas d'influence sur les résultats ($F < 1$).

Erreur moyenne absolue de direction (en degrés) :

Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur proprioception, ni du facteur ordre, ni du facteur champ récepteur ($F_s < 1$).

3.8. Expérience 2.6

3.8.1. Méthode

Les sujets doivent parcourir un arc de cercle, puis le redessiner. Ils effectuent ceci sur 6 arcs de cercle différents. Nous mesurons le temps de parcours de chaque arc de cercle ainsi que l'erreur sur le rayon de courbure des arcs de cercle redessinés. Ils partent toujours de la gauche vers la droite mais ignorent bien sûr la courbure et si l'arc est montant ou descendant.

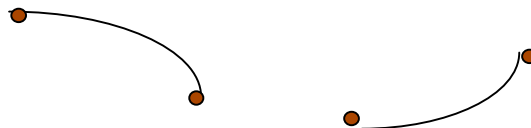


Figure 10. Expérience 2.6. Parcours d'arc de cercle

3.8.2. Résultats

Temps de parcours

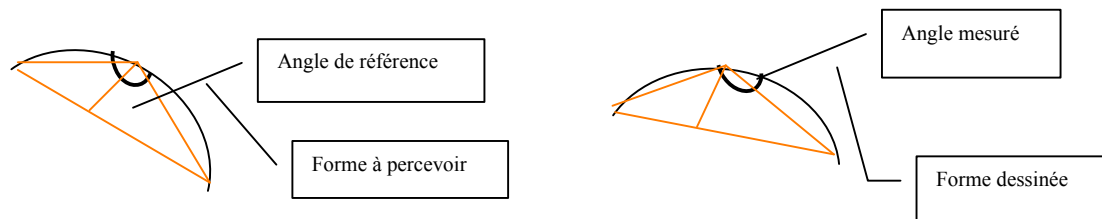
Les sujets ont des performances moins bonnes avec proprioception (23.7 s) que sans proprioception (20.2 s). Cet effet négatif de la présence d'informations proprioceptives n'est pas significatif ($F < 1$).

Les performances sont significativement affectées par le type de champ récepteur utilisé ($F(1,7) = 42.01$, $p < 0.0001$). Les sujets ont de meilleurs résultats avec le champ récepteur 16 (14.9 s) qu'avec le champ récepteur 1 (29.0 s).

L'ordre dans lequel les sessions sont passées n'a pas d'influence sur les résultats ($F < 1$).

Erreur moyenne sur l'angle de courbure du segment redessiné

Une estimation de l'angle de courbure est mesurée à partir des formes dessinées de la façon suivante :



L'erreur est la valeur absolue de la différence entre l'angle mesuré et l'angle de référence. Nous n'observons pas d'effet significatif du facteur proprioception, ni du facteur ordre, ni du facteur champ récepteur ($F_s < 1$).

3.9. Expérience 2.7

3.9.1. Méthode

La dernière expérience effectuée consiste en un suivi passif d'arcs de cercle. Les sujets ne sont en contact qu'avec le boîtier de stimulation tactile. Nous leur distribuons les successions de stimulations tactiles correspondants à l'exploration de 3 arcs de cercles différents qu'ils doivent ensuite redessiner. Notons que les sujets utilisant le CR1 ne peuvent effectuer cette expérience dans la session sans proprioception. Nous mesurons l'erreur sur le rayon de courbure des arcs de cercle redessinés.

3.9.2. Résultats

Nous constatons que les sujets parviennent assez bien à redessiner la courbure de l'arc de cercle. Avec la seule proprioception (champ récepteur extéroceptif mono, CR1), l'erreur absolue moyenne est de 10,9°. Avec le seul parallélisme (champ récepteur extéroceptif 16, CR16), l'erreur absolue moyenne est de 13,3°. Mais quand on combine les deux sources d'information l'erreur absolue moyenne est de 18,4°. Nous allons revenir sur ces résultats dans la discussion générale.

4. Discussion générale

L'ensemble des résultats obtenus nous permet de dégager que, dans le cadre de ces expériences, la modélisation d'une proprioception prothétisée n'est pas efficace. La présence d'informations proprioceptives n'améliore jamais significativement les résultats des sujets. Dans deux des tâches proposées, elle constitue au contraire une gêne importante pour les sujets. Nous n'avons ainsi pas pu montrer une utilité spécifique de l'utilisation d'une proprioception prothétisée, que ce soit pour la maîtrise du geste, sa répétition ou sa prolongation, ou pour la reconnaissance ou la production de formes. Pourtant la proprioception est bien nécessaire quand on agit dans le vide, sans objet externe pour se repérer, mais ici l'interaction avec la proprioception naturelle reste prévalente puisque dans cette expérience elle restait synchronisée avec les actions corporelles.

L'effet du parallélisme des champs récepteurs est en revanche massif. Les sujets ont toujours de meilleurs résultats lorsqu'ils utilisent la matrice de champs récepteurs parallèles. Cet

effet se révèle significatif, à l'exception de deux tâches. Cette influence est particulièrement importante lors des tâches d'exploration, le temps passé à découvrir les formes varie parfois du simple au double selon le champ récepteur utilisé.

Cet avantage du parallélisme pour la facilitation des tâches perceptives proposées nous semble pouvoir s'expliquer de la façon suivante. Dans la mesure où le dispositif technique crée un découplage entre les actions dans l'environnement corporel (ce que l'on fait), et les actions dans l'environnement virtuel (ce que l'on y fait), seule une extéroception donnant accès aux objets de cet environnement virtuel permet de découvrir ce que l'on fait relativement à eux. Le parallélisme des champs récepteurs extéroceptifs permet un meilleur contrôle de ses actions comme on le voit par les vitesses nettement plus grandes dans le suivi de ligne. Le parallélisme améliore la perception parce qu'il donne en entrée sensorielle une information plus riche sur la position et l'orientation des lignes à reconnaître, et donc une meilleure perception des mouvements effectués dans le voisinage de ces lignes. Autrement dit, le parallélisme a une fonction « proprioceptive » basée sur des capteurs extéroceptifs. Par exemple, lorsqu'il s'agit de suivre une ligne fragmentée en 4 segments (expérience 2.1), le parallélisme intervient certainement en donnant une meilleure perception de l'orientation à suivre dans les espaces entre les différents segments, mais cette perception est tout autant la perception de la direction de la ligne que la perception de la direction du geste de suivi. De même, dans l'expérience sur la perception de la courbure d'un arc de cercle (2.6), le parallélisme, en permettant un meilleur suivi (contrôle du changement progressif de direction) permet de mieux comprendre le geste global effectué et donc de mieux le reproduire quand il s'agit de le dessiner. D'ailleurs, après cet apprentissage, dans l'expérience suivante (suivi passif 2.7), les sujets se révèlent capables d'interpréter la séquence temporelle des stimulations sensorielles comme le passage de cet arc de cercle sous leur doigt. Dans la mesure où reconnaître la courbure d'un arc de cercle consiste à reconnaître le mouvement effectué pour le suivre, les sujets ont bien appris à reconnaître dans les informations reçues la nature du mouvement effectué.

De leur côté, les informations sensorielles délivrées par une proprioception prothétisée ne peuvent avoir une signification spatiale que de façon dérivée. C'est seulement par association entre un déplacement connu effectué et le retour sensoriel proprioceptif qu'il produit que celui-ci pourra être appris. Ceci signifie qu'il faut d'abord savoir ce que l'on fait dans l'environnement virtuel pour seulement ensuite pouvoir comprendre que cette action sera associée à tel retour proprioceptif. On aurait donc aimé que la proprioception prothétisée se calibre progressivement sur les actions effectuées telles qu'elles sont reconnues dans l'activité perceptive via les capteurs extéroceptifs. Ce n'est pas ce que nous avons observé. Au contraire, la présence d'information proprioceptive interagit négativement avec les données extéroceptives. Cet échec nous semble s'expliquer parce que dans notre dispositif expérimental, le couplage entre ce que l'on fait dans l'espace corporel (mouvements de la souris) et ce que l'on fait dans l'espace virtuel (mouvements des champs récepteurs) reste suffisamment isomorphe pour que ce soit sur la base de la proprioception naturelle que se calibre la proprioception prothétisée. Or cette information sensorielle supplémentaire est très pauvre relativement à la proprioception corporelle. Elle est inutile dans la plupart des expériences où elle joue donc plutôt un rôle négatif en encombrant le sujet d'une information redondante. Ce n'est que dans la dernière expérience (2.7) que la proprioception prothétisée s'est révélée utile. En effet, dans le suivi passif (avec champ extéroceptif mono) on ne peut s'appuyer que sur la seule information proprioceptive artificielle. On voit que celle-ci a bien été apprise. Mais puisque les sujets travaillaient ici avec un unique champ récepteur, on comprend que c'est bien essentiellement sur la base de la correspondance entre proprioception naturelle et proprioception artificielle que cette dernière a été apprise, certainement essentiellement lors de l'expérience précédente du suivi actif de courbure. Dès lors, lorsque les deux sources d'information sont présentes, parallélisme extéroceptif et proprioception prothétisée, il y a interaction négative. Cela nous semble s'expliquer par la complexité des informations sensorielles à traiter simultanément, informations qui n'ont pas de cohérence claire

entre elles. La proprioception prothésisée semble troubler la concentration du sujet plutôt que de l'aider.

D'un point de vue ergonomique, l'idée d'une modélisation d'un retour proprioceptif sur ses actions via un canal d'information spécialement dédié devait nous permettre d'accroître la perception sans enrichir le flux des signaux relatifs à la figure elle-même. L'absence d'effet lié aux informations proprioceptives ne nous permet pas d'envisager l'amélioration du logiciel par ce biais.

Une piste à poursuivre, si l'on veut que la proprioception prothésisée se calibre plutôt sur les données extéroceptives apportées par le parallélisme, serait de proposer une autre façon de distribuer les informations proprioceptives. Si, pour un mouvement donné, les stimuli tactiles proprioceptifs ressemblaient suffisamment aux stimuli tactiles extéroceptifs produits par ce mouvement à proximité d'un objet, on aurait plus de chance d'obtenir l'apprentissage d'une relation directe entre ces deux types d'information.

Remerciements

Nous aimerions remercier Caroline Couraud et Younes Boukari, étudiants à l'Université de Technologie de Compiègne, pour avoir travaillé sur ces expériences durant leur stage d'étude. Nous remercions également Dominique Aubert, ingénieur à l'Université de Technologie de Compiègne pour avoir mis en place le matériel d'expérimentation.

Références

- Arno, P., Vanlierde, A., Streel, E., Wanet-Defalque, M.-C., Sanabria-Bohorquez, S. et Veraart, C. (2001). Auditory substitution of vision: Pattern recognition by the blind. *Applied Cognitive Psychology*, 15, 509-519.
- Arno, P., Wanet-Defalque, M.-C., Capelle, C., Catalan-Ahumada, M., et Veraart, C. (1999). Auditory coding of visual patterns for the blind. *Perception*, 28, 1013-1030.
- Auvray, M., Hanneton, S. & O'Regan J.K. (2003). Localisation and form recognition in sensory substitution. *Perception*, 32, supplement, 94.
- Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain Mechanisms in Sensory Substitution*, New-York : Academic Press.
- Bach-y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F., White, B., et Scadden, L. (1969). Visual substitution by tactile image projection. *Nature*, 221, 963-964.
- Bliss, J. C. (1978). Reading machines for the blind. In G. Gordon (Ed.). *Active touch—The mechanisms of recognition of objects by manipulation: A multidisciplinary approach*. (pp 243-248). Oxford : Pergamon Press.
- Capelle, C., Trullemans, C., Arno, P., et Veraart, C. (1998). A real time experimental prototype for enhancement of vision rehabilitation using auditory substitution. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 45, 1279-1293.
- Craig, J. C. (1976). Vibrotactile letter recognition: The effects of a masking stimulus. *Perception & Psychophysics*, 20, 317-326.
- Craig, J. C. (1981). Tactile letter recognition: Pattern duration and modes of pattern generation. *Perception & Psychophysics*, 30, 540-546.
- Cronly-Dillon, J., Persaud, K. et Blore, F. (2000). Blind subjects construct conscious mental images of visual scenes encoded in musical form. *Proc. R. Soc. Lond. B* 267, 2231-2238.
- Cronly-Dillon, J., Persaud, K. et Gregory, R. P. F. (1999). The perception of visual images encoded in musical form : a study in cross modality information transfer. *Proc. R. Soc. Lond. B* 266, 2427-2433.
- Hanneton S., Gapenne O., Genouel C., Lenay C. et Marque C. (1999). Dynamics of shape recognition through a minimal visuo-tactile sensory substitution interface. In *Proceedings of the Third Int. Conf. On Cognitive and Neural Systems* (pp. 26-29). Boston, USA.

- Jansson, G. (1983). Tactile guidance of movement. *International journal of neuroscience*, 19, 37-46.
- Kay, L. (1964). An ultrasonic sensing probe as a mobility aid for the Blind. *Ultrasonics*, 2, 53.
- Kaczmarek, K. A. et Bach y Rita, P. (1995). Tactile displays. In W. Barfield & T.A. Furness (Eds.), *Virtual Environments and Advanced Interface Design* (pp. 349-414), New York : Oxford,.
- Kaczmarek, K. A. et Haase, S. J. (2003). Pattern identification as a function of stimulation current on a fingertip-scanned electrotactile display. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 11, 269-275.
- Kaczmarek, K. A. et Haase, S. J. (2003). Pattern identification and perceived stimulus quality as a function of stimulation current on a fingertip-scanned electrotactile display. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 11, 9-16.
- Lemaire, L. (2002). Approche comportementale et anatomo-fonctionnelle de la question de Molyneux. Thèse de doctorat de Psychologie : Strasbourg .
- Loomis, J. M. (1974). Tactile letter recognition under different modes of stimulus presentation. *Perception & Psychophysics*, 16, 401-408.
- Loomis, J. M. (1980). Interaction of display mode and character size in vibrotactile letter recognition. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 16, 385-387.
- Lenay C., Canu, S. et Villon, P. (1997). Technology and perception : the contribution of sensory substitution systems. In *Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Technology* (pp. 44-53). Aizu, Japan : Los Alamitos IEEE.
- Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C. et Genouëlle, C. (2000). La suppléance sensorielle : limites et perspectives. In Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour Connaître. Psychologie Cognitive de la Perception Tactile Manuelle* (pp. 287-306), Paris : PUF.
- Lenay, C., Stewart, J. et Gapenne, O. (2002). Espace d'action technique et geste perceptif. *Technologie – Idéologie – Pratiques, Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 14, 215-230.
- Sampaio, E., Maris, S. et Bach-Y-Rita, P. (2001). Brain plasticity : 'Visual' acuity of blind persons via the tongue. *Brain Research*, 908, 204-207.
- Sribunruangrit, N., Marque, C., Lenay, C., Gapenne, O. et Vanhoutte, C. (2004). Speed-accuracy tradeoff during performance of a tracking task without visual feedback. *IEEE transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12, 131-139.