HAL
open science

Assistance tactile à la localisation de cibles périphériques pour des personnes à vision tubulaire

Damien Appert, Damien Camors, Jean-Baptiste Durand, Christophe Jouffrais

To cite this version:

Damien Appert, Damien Camors, Jean-Baptiste Durand, Christophe Jouffrais. Assistance tactile à la localisation de cibles périphériques pour des personnes à vision tubulaire. IHM 2015 27ème Conférence Francophone sur l'interaction Homme-Machine, Oct 2015, Toulouse, France. pp.1-10. hal-01282065

HAL Id: hal-01282065

https://hal.science/hal-01282065v1

Submitted on 7 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID : 15061

The contribution was presented at :
http://ihm2015.afihm.org/

To cite this version : Appert, Damien and Camors, Damien and Durand, Jean-Baptiste and Jouffrais, Christophe *Tactile cues for improving target localization in subjects with tunnel vision.* (2015) In: 27th International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM 2015) ; In-Cooperation with : SIGCHI ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction, 27 October 2015 - 30 October 2015 (Toulouse, France).

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Assistance tactile à la localisation de cibles périphériques pour des personnes à vision tubulaire

Damien Appert *
Université de Toulouse & CNRS ; UPS ; IRIT ; Toulouse, France
Damien.Appert@irit.fr

Damien Camors *
Université de Toulouse & CNRS ; UPS ; IRIT Toulouse, France
Damien.Camors@irit.fr

Jean-Baptiste Durand
CNRS; CerCo; Toulouse, France
jbdurand@cerco.ups-tlse.fr

Christophe Jouffrais
CNRS; Université de Toulouse; UPS; IRIT; France
Christophe.Jouffrais@irit.fr

*** co-premiers auteurs**

RESUME

La vision tubulaire est une déficience visuelle dans laquelle seul le champ central de la vision est préservé. Elle génère de grandes difficultés dans la vie quotidienne, notamment lorsqu'il s'agit de repérer un objet d'intérêt dans l'environnement. Des informations tactiles, considérées comme discrètes, personnelles et peu invasives, peuvent permettre d'améliorer le comportement de recherche visuelle. Dans cette étude, nous avons conçu quatre techniques tactiles permettant de localiser un point spécifique dans l'espace. Les stimulations tactiles étaient soit un seul stimulus soit un train de stimuli transmis dans un système de coordonnées cartésien ou polaire. Les quatre techniques ont été comparées dans une tâche d'orientation de la tête. La plus efficace des techniques a été évaluée avec une tâche de recherche visuelle dans un environnement virtuel complexe. L'évaluation impliquait dix sujets avec un champ visuel artificiellement restreint à 10°, et un sujet avec une vision tubulaire due à un glaucome. Notre dispositif d'assistance a significativement amélioré l'efficacité de la recherche visuelle d'un facteur trois. Le dispositif pourrait être facilement intégré dans des lunettes intelligentes et détecter des cibles d'intérêt, soit sur demande, soit de façon automatique (par ex. les obstacles potentiels), facilitant ainsi, la recherche visuelle et la perception spatiale de l'environnement.

Mots Clés :

Interaction tactile ; Technologies d'assistance ; déficience visuelle ; perception spatiale ; interaction en mobilité

ACM Classification Keywords

H.5.2 **[Information Interfaces and Presentation]**: User Interfaces — *Input devices and strategies*

INTRODUCTION

La rétinite pigmentaire et le glaucome sont des affections dégénératives de la rétine. Ces deux affections conduisent à une perte progressive du champ visuel et éventuellement à la cécité [22]. Ces affections, actuellement incurables, commencent par détériorer la vision périphérique et causent ce que l'on appelle la vision « tubulaire » ou « en tunnel ». Pour comprendre ce qu'est une vision tubulaire, il faut imaginer regarder à travers un tuyau, le champ visuel est alors réduit à quelques degrés d'angle. Il peut y avoir d'autres symptômes associés comme une gêne visuelle importante dans la pénombre (héméralopie) ou une adaptation plus lente aux changements de luminosité. La vision tubulaire a d'importantes conséquences sur la recherche visuelle [38,46], et par conséquent l'autonomie des patients [25]. Par exemple des tâches usuelles comme trouver un produit sur une étagère ou rechercher un ami dans une foule, deviennent très difficiles et chronophages quand la complexité visuelle de l'environnement s'accroît [49]et que le champ visuel de l'utilisateur est dégradé[34].

ETAT DE L'ART

De nombreuses technologies ont été conçues pour améliorer la recherche visuelle et la perception de l'espace chez des personnes avec un champ visuel limité. Certaines sont basées sur les capacités visuelles résiduelles, mais d'autres sont dépendantes des modalités auditives et tactiles. Des dispositifs spécifiques à la vision tubulaire ont été élaborés afin d'assister la localisation de cibles qui sont hors du champ visuel. Certains dispositifs s'appuient sur le champ visuel résiduel et reposent sur une projection de l'information présente dans la partie aveugle dans ce champ résiduel. Une première possibilité consiste à compresser l'information visuelle avec une « minification » optique [32,33]. D'autres dispositifs utilisent un prisme qui dévie l'information visuelle dans le champ visuel résiduel [50]. Dans plusieurs dispositifs basés sur la réalité augmentée, une information visuelle spécifique (par ex. la détection de contours) peut être superposée dans la partie intacte du champ visuel [48]. Dans tous ces cas, le champ visuel résiduel est surchargé avec plus d'informations visuelles, ce qui détériore l'acuité visuelle, perturbe l'exploration visuelle, et déforme la relation spatiale entre les objets [19]. Tous ces inconvénients peuvent avoir un impact important sur la recherche visuelle [7].

Des technologies d'assistance basées sur l'audition ont aussi été proposées. Les systèmes de substitution sensorielle convertissent toute une scène visuelle en signaux auditifs (ex. « the vOICe »). Ils peuvent fournir à l'utilisateur suffisamment d'informations pour une tâche de locomotion, de localisation ou de pointage [1]. Cependant, même une tâche simple de pointage requiert beaucoup de temps et d'attention. De plus, les sons naturels de l'environnement, ont un rôle important dans de nombreuses tâches de la vie quotidienne. Les personnes déficientes visuelles sont donc réticentes à encombrer leur système auditif avec des informations additionnelles.

La substitution sensorielle a aussi été proposée en utilisant la modalité tactile. Dans ces systèmes, le principe consiste à transformer l'image provenant d'une caméra en un ensemble de signaux tactiles appliqués sur la langue ou l'abdomen [2,3]. Plusieurs expériences réalisées en condition de laboratoire montrent qu'il est par exemple possible de reconnaître des formes géométriques. Cependant, après quarante ans de recherches sur la substitution sensorielle, aucun dispositif n'est utilisable dans des conditions écologiques [36]. De plus, ils ne sont pas utilisables pour localiser un objet spécifique dans des scènes naturelles pouvant être surchargées.

Plutôt que de substituer toute une scène visuelle, les dispositifs d'assistance peuvent être utilisés pour localiser précisément une cible ou un point d'intérêt dans la scène [5]. Dans le cas d'un utilisateur avec une vision tubulaire, il est possible de guider le regard ou la main vers une région spécifique dans l'environnement. Par exemple, il est possible de faciliter le pointage vers une cible grâce à des sons binauraux en fournissant à l'utilisateur l'azimut et l'élévation de la cible [12,31]. Cependant, comme mentionné précédemment, les informations auditives additionnelles interfèrent avec les sons de l'environnement, ce qui réduit leur utilisabilité et peut masquer un danger potentiel [27].

Dans cette étude, nous avons conçu un dispositif tactile, privé et peu intrusif, permettant de localiser des cibles spécifiques dans l'espace. Après un état de l'art sur les dispositifs tactiles, nous décrivons nos choix de conception, ainsi que les différentes expériences que nous avons menées dans le but d'améliorer la localisation de cibles périphériques. Ces expériences ont été réalisées avec un simulateur de vision tubulaire dans lequel le champ visuel a été restreint artificiellement. Dans la dernière expérience, le dispositif a été testé avec un sujet atteint d'un glaucome.

DISPOSITIFS TACTILES POUR LA PERCEPTION SPATIALE

Les stimulations tactiles ne sont pas en compétition avec le traitement de stimuli auditifs ou visuels écologiques. De plus, elles permettent de réaliser des discriminations spatiales et temporelles avec des performances excellentes [21]. Les dispositifs tactiles ont été utilisés dans un grand nombre d'applications concernant le guidage, la navigation, la notification, les alertes, etc. Par exemple, Boll et ses collaborateurs ont utilisé un dispositif tactile sur le poignet ou le torse dans le but d'assister la navigation et le guidage [24,26]. Les dispositifs tactiles peuvent aussi servir de détecteur d'obstacle afin de prévenir toute collision pendant un déplacement [9]. Des travaux antérieurs ont également porté sur la localisation d'une cible spécifique dans l'environnement. Dans ce domaine, deux types d'indices ont été décrits par Lehtinen et al. ([35]) : les indices que nous appellerons de *guidage* (« guiding » cues) et *d'anticipation* (« preview » cues). Les indices de guidage fournissent une information continue de l'erreur entre la cible et la partie mobile du corps, généralement la main. Les indices de guidage peuvent inciter l'utilisateur à porter attention à une position précise dans l'espace, ce qui est particulièrement utile quand la cible est cachée dans une scène très fortement encombrée [15,16,35,45]. Par exemple, Lehtinen et al. ont placé deux vibreurs dans la paume et deux sur le dos de la main des utilisateurs [35]. La main des utilisateurs était alors continuellement guidée vers une lettre B parmi un ensemble de lettres P distractives. Avec le guidage tactile, ils ont observé une réduction significative du temps nécessaire pour trouver la lettre B. Cependant, les sujets admettaient « se concentrer d'abord sur le signal tactile » puis « sauter avec le regard vers la zone indiquée». Ce faisant, les sujets ont ignoré le guidage tactile continu. Ils ont plutôt utilisé le signal tactile comme un indice d'anticipation avant de commencer la recherche visuelle dans une région déterminée de l'espace. De plus, ils ont mentionné ne pas être convaincus que le guidage soit utile après avoir commencé la recherche. Par conséquent, il semblerait que les indices de guidage soient moins pertinents que les indices d'anticipation. Les indices d'anticipation indiquent la direction ou la partie de l'espace à atteindre avant qu'une quelconque partie du corps ne bouge. Les indices d'anticipation n'accroissent pas la charge cognitive, notamment pendant la phase d'exploration. Ceci est particulièrement important durant une recherche visuelle complexe, et d'autant plus pour les personnes avec une vision tubulaire.

Les indices d'anticipation ont déjà été utilisés dans une tâche de recherche visuelle [29,37,44]. Les expériences ont montré une réduction significative du temps de recherche. Malheureusement, elles ont été utilisées pour fournir des informations de directions imprécises (par ex. « dans le coin en haut à gauche »), et de surcroît dans un espace non surchargé. Ainsi, la question demeure : les dispositifs tactiles peuvent-ils assister des personnes déficientes visuelles, et plus particulièrement celles avec une vision tubulaire, afin de trouver une cible spécifique dans l'environnement ? Dans ce cas, les indices d'anticipation doivent indiquer une portion précise de l'espace, suffisamment proche de la cible d'intérêt pour que celle-ci se retrouve directement dans le champ visuel résiduel.

Dans cette étude, nous avons conçu et comparé plusieurs types d'indices tactiles d'anticipation (exp. 1). Nous avons ensuite utilisé le plus efficace et le plus satisfaisant dans une tâche de recherche visuelle avec des sujets voyants sur lesquels le champ visuel était artificiellement réduit (exp. 2). Nous avons finalement validé ce résultat avec un patient atteint de glaucome et présentant un déficit visuel important (exp. 3).

EXP 1 : CONCEPTION ET COMPARAISON D'INDICES TACTILES PERMETTANT DE LOCALISER UNE CIBLE PERIPHERIQUE

Conception du code tactile

Dans cette première expérience, nous avons conçu et comparé quatre codes tactiles (tacton [5] et référentiel) permettant de localiser une cible dans l'environnement. La conception du dispositif tactile permettant d'accélérer une

tâche de recherche visuelle est détaillée dans la seconde expérience.

Référentiel et système de coordonnées

Dans un dispositif d'assistance à la localisation de cibles visuelles, les caméras sont indispensables. Elles peuvent être facilement montées sur des lunettes, et peuvent être utilisées pour localiser des cibles spécifiques dans une scène visuelle. Le système peut aussi intégrer un accéléromètre pour compenser une faible résolution temporelle de la caméra et procurer la position des cibles malgré les déplacements de la tête (voir [30] par ex).

Le plus logique des référentiels pour guider le regard vers la cible est celui des yeux avec comme origine, la fovéa. En supposant que la cible ait été localisée par la caméra attachée à la tête, et que la position des yeux dans l'orbite soit connue grâce à un oculomètre portable, l'indice tactile peut alors directement indiquer l'erreur entre la fovéa et la cible. Cependant, les oculomètres portables sont chers et doivent être fréquemment calibrés. Comme les yeux et la tête sont synchronisés pendant les mouvements du regard [42], la tête peut être un référentiel plus pertinent pour assister la recherche visuelle. En effet, cela repose uniquement sur la présence de la caméra montée sur les lunettes. Les indices de guidage peuvent alors directement indiquer l'erreur entre la position de la tête et la position de la cible dans l'image sans aucune transformation de coordonnées.

La localisation d'une cible dans l'espace repose sur trois coordonnées, à savoir l'azimut, l'élévation et la profondeur (ou distance). Cependant la profondeur entre l'utilisateur et la cible n'est pas obligatoire pour la recherche visuelle. En effet, quand la cible est localisée dans le plan de l'image de la caméra, seules deux coordonnées (azimut et élévation) suffisent pour amener le champ visuel en face de la cible. Dans le but de transmettre ces deux coordonnées, nous avons évalué deux systèmes de coordonnées (SC) différents, cartésien et polaire, ancrés sur la tête.

Dans le système cartésien, la position de la cible était décomposée en deux indices tactiles successifs dépendant de l'orientation de la tête. L'azimut (axe horizontal) était présenté en premier, suivi de l'élévation (axe vertical). Dans le système polaire, l'azimut et l'élévation de la cible étaient convertis en deux stimulations successives représentant un angle et une distance radiale (cf. Figure 1).

Codage des tactons

Comme mentionné précédemment, les indices d'anticipation ne guident pas progressivement vers une cible. Après une brève stimulation, l'utilisateur doit être capable d'estimer la position de la cible avec une bonne précision. Si la stimulation n'est pas suffisamment explicite, l'utilisateur devra redemander les indices, ce qui n'est pas utilisable. Par conséquent, l'indice tactile doit être aussi bref que possible et permettre d'accélérer la phase suivante de recherche visuelle. Nous avons évalué deux codes tactiles différents (cf. Figure 1).

Le premier est basé sur une seule vibration de durée variable correspondant à la grandeur de la coordonnée transmise. La durée maximale est de 1,5 secondes. Le choix de cette durée était basé sur des pré-tests succincts, non-détaillés ici, qui indiquaient que la discriminable était possible avec cette durée, et qu'une durée plus longue semblait gênante pour les utilisateurs. La durée maximale de 1,5 secondes correspondait à un azimut ou une élévation maximums de 45°.

Dans le second code, une coordonnée est définie comme un train (une séquence) de courtes pulsations de 200 ms séparées entre elles par 100 ms. Le nombre de pulsations dans le train correspond à la zone cible dans l'espace frontal, avec chaque pulsation indiquant une zone de 9°. Le train comporte cinq pulsations au maximum, correspondant au même maximum de 45°.

Ces deux codes tactiles ont été évalués dans les deux systèmes de coordonnées décrits précédemment. Par conséquent, nous avons évalué quatre techniques notées: stimulus continu dans un SC Cartésien (C/Si), train de pulsations dans un SC Cartésien (C/Tr), stimulus continu dans un SC Polaire (P/Si) et train de pulsations dans un SC Polaire (P/Tr).

Position du dispositif tactile

Les dispositifs tactiles peuvent être placés sur différentes parties du corps humain. Afin d'assister la recherche visuelle, une solution serait de placer un dispositif tactile

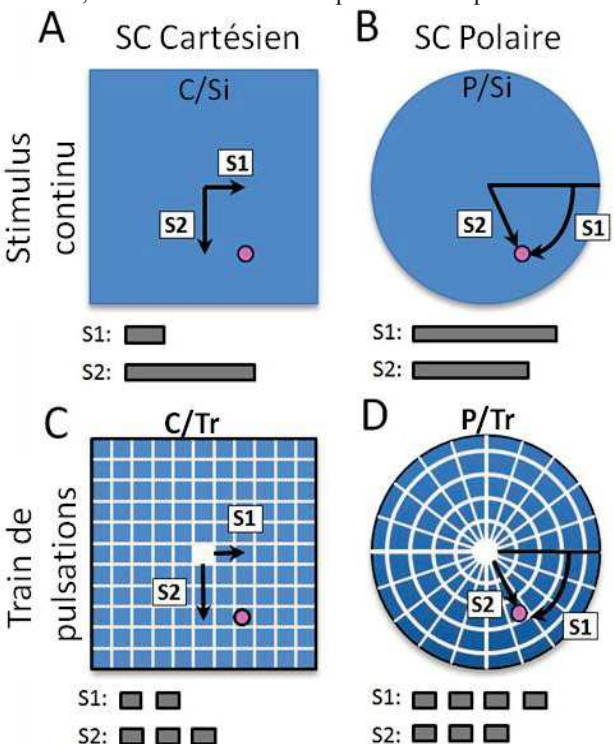

Figure 1 : Codage tactile d'une même cible (point rose) avec quatre techniques différentes. Deux codes tactiles ont été utilisés : le stimulus continu (A,B) et le train de pulsations (C,D). Les coordonnées de la cible sont transmises dans les SC cartésien (A,C) ou polaire (B,D). Les deux coordonnées sont rendues par deux stimulations successives (S1, S2) représentées avec des barres grises. Dans cette expérience, la position de la cible était choisie de façon pseudo-aléatoire dans toute la zone bleue.

autour des yeux. La correspondance entre la stimulation et la direction souhaitée regard serait probablement très intuitive. Cependant, la sensibilité tactile sur le visage est très importante. Le dispositif tactile pourrait rapidement provoquer une irritation. De plus, tous les sujets interrogés étaient réticents à porter un dispositif sur le visage.

Les indices directionnels sont le plus souvent transmis par des dispositifs tactiles attachés à une ceinture, sur le dos ou sur les mains. La ceinture est une solution à la fois élégante et non-intrusive pour transmettre l'azimut [14,26], mais pas pour l'élévation. Le dos et le torse présentent une importante surface tactile, ce qui permet d'y placer un nombre important de vibreurs. Les premières études ont utilisé des vibreurs placés sur une chaise dans le but de transmettre des indices d'anticipation sur le dos [29,37]. Ce dispositif n'était pas mobile ce qui en limitait l'usage. Plus récemment, les vibreurs ont été placés dans des gilets [13], ce qui peut freiner l'acceptabilité du dispositif d'assistance.

La main est souvent utilisée [15,16,35,45], ce qui est évidemment un avantage quand un mouvement de celle-ci est requis. En effet, cela évite de transformer les coordonnées entre le capteur et l'effecteur, et par conséquent facilite les tâches de pointage. Cependant, les dispositifs qui sont placés dans la paume de la main posent des problèmes de préhension et de manipulation. Le dos de la main ou le poignet sont de bonnes alternatives. Le poignet peut offrir une discrimination efficace des stimuli [10,40]. Contrairement au dos et à la hanche, le poignet est impliqué dans le processus visuo-moteur permettant la coordination œil-main [23]. Un autre argument pour fixer le dispositif tactile au poignet est l'arrivée des « smartwatchs » dans la communauté des déficients visuels. Ces dispositifs possèdent des vibreurs pouvant être activés à distance (par ex. en Bluetooth). Si nécessaire, des vibreurs additionnels peuvent être attachés au bracelet de la montre.

Évaluation expérimentale

Nous avons évalué l'utilisabilité des quatre techniques dans une tâche d'orientation de la tête. Les sujets portaient un casque de réalité virtuelle fournissant un champ visuel restreint à dix degrés et un vibreur attaché au poignet (cf. Figure 2A). Pour chaque condition, ils devaient estimer le plus précisément possible la position d'une cible après avoir reçu les deux indices tactiles correspondant à sa coordonnée. Nous avons utilisé un design expérimental à 2x2 facteurs, avec le système de coordonnées (Cartésien vs. Polaire) et le code tactile (continu vs. train) comme facteurs principaux. Chaque sujet a passé les quatre conditions dans un ordre pseudo-aléatoire. Pour chaque condition, les vingt premiers essais étaient utilisés comme une phase de familiarisation et n'étaient pas inclus dans les résultats. Ils étaient suivis par quarante essais où les mouvements de la tête étaient enregistrés.

Dans cette première expérience, un quadrant du référentiel était sélectionné aléatoirement pour chaque essai et était indiqué par un indice visuel. Dans le repère cartésien,

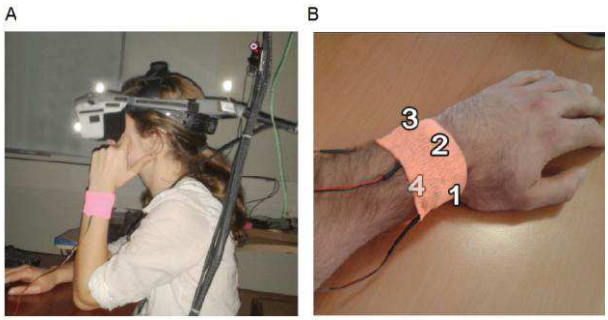

Figure 2 : Photos d'un sujet voyant équipé avec l'interface tactile au poignet et le casque de réalité virtuelle permettant de simuler la vision tubulaire. Les mouvements de la tête sont enregistrés par un système infrarouge, visible en A. Dans l'expérience 1, les sujets ne disposent que d'un seul vibreur, placé sur le poignet par une bande cohésive (A). Dans les expériences 2 et 3, quatre vibreurs sont placés sur le poignet gauche (B). Le quatrième vibreur, placé sur la partie antérieure du poignet n'est pas visible sur la photo.

deux flèches rouges étaient affichées sur les deux demi-axes du quadrant choisi. Dans le repère polaire, une barre rouge indiquait un demi-axe parmi les quatre possibles. Les deux coordonnées correspondant à la position de la cible dans ce quadrant étaient alors transmises par un seul vibreur, séparées par un silence de 0,5s. Ce couple de modalités contraignait la stimulation sur un seul vibreur et permettait aux sujets de se concentrer uniquement sur le décodage de la stimulation tactile des deux coordonnées.

À la fin de chaque condition, les sujets devaient remplir un questionnaire d'utilisabilité (SUS) sur la technique qu'ils venaient d'utiliser. Pour chaque sujet, l'expérience a duré environ une heure et demie.

Participants

Six sujets (quatre hommes et deux femmes, âgés de 27,2±2,6 ans) ont réalisé l'expérience. Conformément à la Déclaration d'Helsinki, ils ont donné leur consentement éclairé par écrit, avant de participer à l'étude. L'étude a été approuvée par un comité local d'éthique (CLERIT).

Dispositif expérimental et stimuli

Les sujets étaient placés dans une scène visuelle artificielle contenant seulement un fond bruité (ressemblant à un ciel étoilé). Le fond était utilisé pour fournir un feedback visuel pendant les mouvements de la tête, mais ne fournissait aucune information sémantique ou symbolique pouvant servir de repère. Pendant l'expérience, le champ visuel du sujet dans le casque de réalité virtuelle était réduit à dix degrés par un masque noir couvrant toute la périphérie du champ visuel.

Les stimuli visuels étaient présentés dans un casque de réalité virtuelle NVisor® SX-60 HMD (NVIS Inc., USA), avec une résolution de 1280x1024 pixels, équivalant à 44x33 degrés d'angle visuel. L'orientation de la caméra (virtuelle) était directement liée à celle de la tête grâce à un système de capture de mouvement cadencé à 60 Hz (OptiTrack®, Natural Point, USA). Les sujets étaient donc libres de regarder autour d'eux (virtuellement) en bougeant la tête. Les sujets étaient assis sur une chaise fixe qui limitait les mouvements de leur tronc. Ils étaient libres

de bouger les yeux mais une croix rouge présentée au centre du champ visuel servait de point d'ancrage. L'environnement virtuel (EV) était généré et animé par le moteur 3D open source Irrlicht (v1.8). Le dispositif tactile, spécialement conçu pour l'expérience, utilisait une carte Arduino® ATmega1280 et des vibreurs VPM2. Les stimuli tactiles étaient transmis via un seul vibreur placé sur le dessus du poignet (cf. Figure 2A). Le vibreur était calibré pour une fréquence de 250 Hz, optimale pour une stimulation tactile sur la peau [39].

Tâche comportementale

Les sujets ont été testés dans une tâche d'orientation de la tête en présence de l'expérimentateur. Le sujet devait estimer le plus précisément possible, la position d'une cible dans en environnement virtuel. A chaque nouvel essai, une cible était générée au hasard dans un espace de 90°x90° d'angle visuel, centré sur la position de la tête. En début d'expérience, chaque sujet devait définir une position de repos, avec la tête bien droite. Cette position était symbolisée par une sphère verte (2° de diamètre) et allumée quand nécessaire. A chaque début d'essai, le sujet devait aligner le centre de son champ visuel (indiqué par une croix rouge) et la sphère verte. Après une durée de 1,4 s à 2 s, les coordonnées de la cible étaient transmises avec le dispositif tactile. A la fin de la transmission, la sphère verte s'effaçait. Le sujet devait alors orienter sa tête vers la position de la cible le plus précisément possible, puis valider cette orientation en appuyant sur la barre d'espace. La validation était toujours suivie par l'affichage de la position de la cible (sphère rouge) et de la position estimée (sphère blanche). Cette phase permettait au sujet d'avoir un feedback de sa performance à chaque essai. Un nouvel essai commençait lorsque le sujet était revenu à sa position de repos.

Résultats

L'erreur de pointage était calculée pour chaque essai, puis moyennée par sujet et par technique. Elle correspond à la distance entre la position de la cible et celle pointée par le sujet. Une analyse de variance à mesures répétées (ANOVA-RM) a montré un effet significatif du référentiel (Cartésien vs. Polaire ; $p<0,05$) mais pas d'effet du code tactile (Continu vs. Train), ni aucune interaction entre ces deux facteurs. La moyenne de l'erreur de pointage liée au référentiel cartésien (9,0±2,1) était plus réduite que celle liée au référentiel polaire (10,6±1,6) (cf. Figure 3A).

Afin de révéler l'existence d'un biais cognitif ou moteur systématique, comme une sous-estimation ou une surestimation des deux coordonnées, nous avons calculé la moyenne de l'erreur de pointage dans chaque référentiel. Nous n'avons pas observé de biais pour le référentiel cartésien. Toutefois dans la condition P/Tr, les sujets sous-estimaient considérablement et systématiquement la distance angulaire (test-t, $p<0,05$, après correction de Bonferroni). De même, dans la condition P/Si, les sujets surestimaient la distance angulaire (test-t, $p<0,05$, après correction de Bonferroni). De plus, indépendamment des techniques, les résultats montrent un effet significatif des

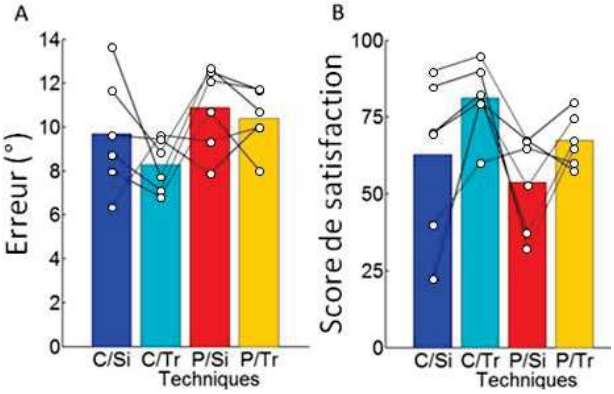

Figure 3 : efficacité (A) et satisfaction (B) pour les quatre techniques conçues. A) L'erreur moyenne de pointage pour chacune des techniques est représentée par des barres de couleur. La moyenne de l'erreur de pointage par sujet est représentée avec des points blancs. La technique C/Tr montre l'erreur moyenne la plus faible (8,2°) avec l'écart-type le plus faible (1,2°). B) Le score moyen de satisfaction (SUS) pour chacune de ces techniques est représenté par des barres de couleur. Le score de satisfaction par sujet est représenté avec des points blancs. La technique C/Tr reçoit le score le plus élevé avec 81,3 ± 12,0.

positions spatiales des cibles (proches/éloignées) sur la précision de pointage. Les sujets sont moins bons à pointer une cible éloignée, avec un ratio moyen de 1,7.

Nous avons finalement comparé les scores d'utilisabilité pour chaque technique par une ANOVA à deux facteurs. Nous avons observé un effet significatif du code tactile sur l'utilisabilité ($p<0,05$). Le « train de pulsations » a été considéré comme plus satisfaisant que le «stimulus continu» (test-t, $p<0,05$) (cf. Figure 3B). Pendant les interviews finales, quatre sujets ont considéré la technique C/Tr comme étant leur préférée. Les deux autres sujets ont considéré la technique C/Tr comme leur deuxième choix.

Conclusions sur la première expérience

Les réponses de pointage sont plus précises dans le référentiel cartésien. Nous n'avons pas observé de biais systématique et la moyenne de l'erreur est de 9.0 degrés d'angle visuel seulement. Au contraire, les stimuli tactiles dans le référentiel polaire ont conduit à des résultats significativement moins précis, avec des biais systématiques. Par conséquent, il apparaît que le référentiel cartésien est plus précis pour communiquer la position d'une cible à l'aide du dispositif tactile.

La satisfaction liée à ces deux systèmes n'est pas significativement différente. Cependant, le score est meilleur lorsque les coordonnées sont communiquées avec le « train de pulsations » plutôt qu'avec le « stimulus continu ». En combinant précision et satisfaction, la technique reposant sur un train de pulsations dans un référentiel cartésien (C/Tr) est la meilleure parmi les quatre que nous avons conçues. De plus, cette technique a montré la plus faible variabilité inter sujets et la meilleure moyenne au SUS. Le score SUS de cette technique a atteint 81±12, ce qui correspond à un « bon » dispositif [4].

EXP 2 : RECHERCHE VISUELLE D'UNE PETITE CIBLE DANS UN SALON VIRTUEL ENCOMBRE

Dans cette deuxième expérience, nous avons évalué la technique la plus efficace et préférée (C/Tr) dans des conditions proches d'une situation écologique. Nous avons simulé un champ visuel sévèrement dégradé (10° d'angle visuel) avec un casque de réalité virtuelle. Les sujets étaient immergés dans un salon et avaient pour tâche de localiser le plus rapidement possible une cible dans cette salle.

Participants

Dix sujets (six hommes et quatre femmes, 25,4±1,6 ans) ont réalisé l'expérience. Ils ont donné par écrit leur consentement éclairé avant de participer à l'étude, conformément à la Déclaration d'Helsinki. L'étude a été approuvée par un comité d'éthique local (CLERIT).

Environnement virtuel, dispositif tactile et stimuli

La configuration expérimentale utilisée dans cette expérience était identique à celle utilisée dans l'expérience précédente.

Une scène virtuelle représentant un salon a été créée avec « Sweet Home 3D® ». Une grande quantité d'objets (lampe, chaise, livre, etc.) a été placée de façon homogène dans l'ensemble de la scène visuelle (cf. Figure 4A). La cible (sphère rose) était placée au hasard dans la scène virtuelle, dans une partie de 90° x 90° d'angle visuel. La scène virtuelle était centrée sur la position de la tête avant chaque essai. Nous nous sommes assurés que la cible et les éléments de la scène visuelle ne pouvaient pas être confondus. Par conséquent, les teintes roses n'étaient pas utilisées dans la scène visuelle. Toutefois, afin d'éviter un effet « pop out » de la cible, celle-ci était légèrement transparente. Contrairement à une situation écologique, la cible était disposée de façon aléatoire dans la scène et non sur des objets. Ce choix permet de mesurer des temps de recherche non biaisés par le contexte, dépendant uniquement de l'assistance tactile. Pendant toute l'expérience, le champ visuel à l'intérieur du casque virtuel était limité à 10°. Un masque noir était appliqué sur le pourtour de la scène, ce qui simulait une vision tubulaire sévère (cf. Figure 4B).

Comme résultat de la première expérience, les deux coordonnées de la cible étaient transmises avec deux « trains de pulsations » tactiles encodés dans un référentiel cartésien. Cependant, afin d'être dans des conditions plus réalistes, les indices tactiles étaient transmis dans cette expérience par quatre vibreurs disposés autour du poignet gauche comme s'ils étaient répartis sur un bracelet (cf. Figure 2B). Les vibreurs étaient attachés avec un bandage. Nous avons choisi les axes et leurs directions de façon arbitraire, en fonction d'une position fréquente de la main gauche au repos, la paume vers le bas. Les coordonnées horizontales étaient transmises par les vibreurs placés vers le pouce (direction droite) et le petit doigt (dir. gauche). Les coordonnées verticales étaient transmises par les vibreurs de la partie dorsale (dir. haut) et ventrale (dir. bas). Comme dans la première expérience, les pulsations tactiles avaient une durée fixe de 200 ms séparées par 100 ms. Le nombre de pulsations dans le train correspondait à la zone cible dans l'espace, avec chaque pulsation indiquant une zone de 9°. Le maximum de stimuli était de cinq et correspondait à l'angle maximal de 45°.

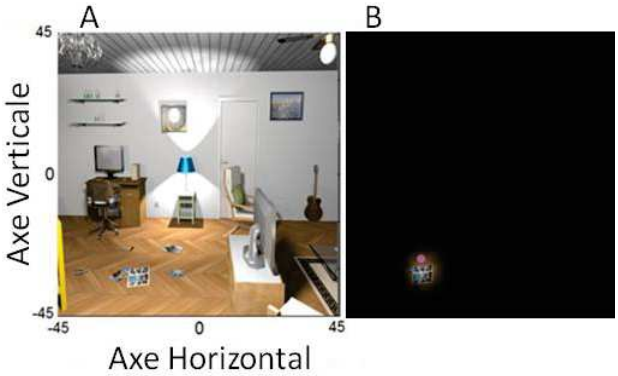

Figure 4 : A – Portion de l'environnement visuel. La cible rose apparaît en bas à gauche. B – Exemple de la simulation artificielle de la vision tubulaire de 10°.

Procédure expérimentale

Les sujets étaient évalués individuellement dans une tâche de recherche visuelle en présence de l'expérimentateur. Le sujet devait estimer le plus rapidement possible la position d'une cible dans un environnement virtuel. Comme dans la tâche précédente, la position de repos de la tête a été définie au début de l'expérience, et était marquée dans l'EV par une sphère verte (2° diamètre) quand nécessaire. Le sujet devait maintenir sa position de repos pendant une durée aléatoire entre 700 ms et 1400 ms. Puis, les coordonnées de la cible étaient transmises au sujet. À la fin de la stimulation, la sphère verte disparaissait, et les lumières de la scène s'allumaient. Le sujet devait alors rechercher et trouver la cible le plus rapidement possible, puis valider sa réponse en appuyant sur la barre d'espace.

Pour chaque technique, le sujet commençait par une phase de familiarisation incluant quinze essais qui n'étaient pas enregistrés. Ensuite, la phase de test était répartie en deux blocs de vingt essais où le temps de recherche et l'ensemble des mouvements de tête étaient enregistrés.

Dans cette expérience, la technique d'assistance était comparée à une condition contrôle absolument identique, sauf qu'elle n'incluait aucun indice tactile concernant l'emplacement de la cible. Chaque sujet a passé quarante essais répartis en deux blocs correspondant aux deux techniques. Cinquante pour cent des sujets ont commencé par la condition contrôle. Les autres ont commencé par la technique d'assistance.

L'ensemble de l'expérience a duré environ soixante minutes par sujet. À la fin de l'expérience, nous avons demandé aux sujets de remplir un questionnaire de satisfaction (SUS) concernant la technique d'assistance.

L'analyse des données

Nous avons mesuré le temps de recherche pour chaque essai. Il correspond à la durée écoulée entre l'envoi de la première stimulation et la validation du sujet. Cela correspond au temps nécessaire pour effectuer la

recherche visuelle. La précision temporelle de 60 Hz nous a permis d'analyser finement, pour chaque essai, la trajectoire de la tête au cours de la recherche visuelle. La distance totale parcourue a été calculée pour chaque essai. De plus, nous avons calculé un ratio exprimant la distance totale sur la distance optimale. La distance optimale est la plus courte distance entre le centre du référentiel et la cible. Ce ratio est complémentaire au temps de recherche.

Résultats

Dans la condition contrôle, nous avons observé différentes stratégies de recherche visuelle en fonction des sujets (cf. Figure 5). Certains sujets ont effectué un motif de balayage sur l'axe vertical ou sur l'axe horizontal (Fig. 5A et B resp.). D'autres sujets ont effectué des cercles concentriques autour du centre de la scène visuelle (Fig. 5C). Ces motifs particuliers n'ont pas été observés en présence d'indices tactiles. Dans ces conditions, les sujets déplaçaient tout d'abord leur tête sur l'axe horizontal, puis sur l'axe vertical (Fig. 5D et E). Nous avons également observé chez certains sujets, des mouvements en diagonale. Cela suggère une bonne intégration des deux coordonnées (horizontales et verticales) avant le mouvement de la tête (Fig. 5F).

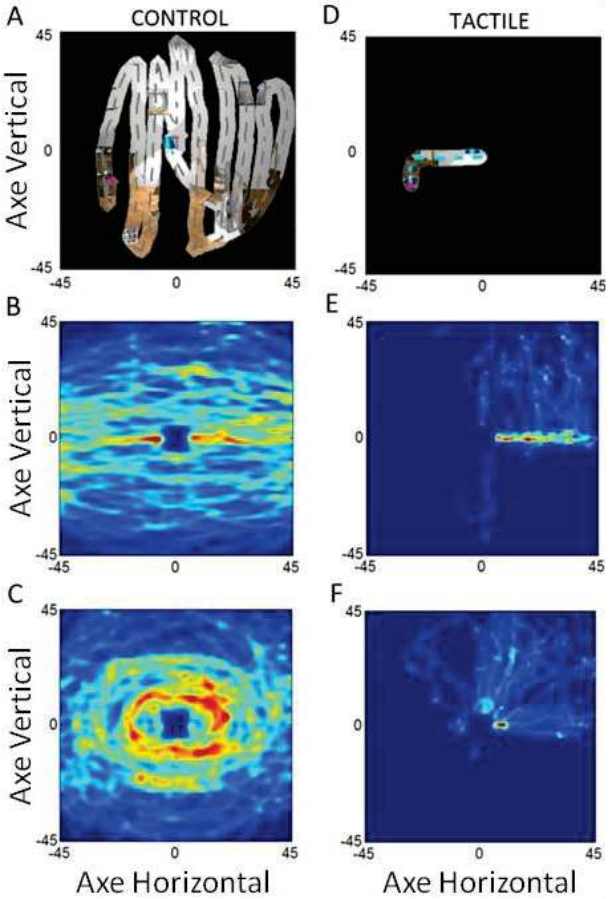

Figure 5 : Exemples de mouvements de tête observés pendant une recherche visuelle dans les conditions contrôle (A, B, C) et tactile (D, E, F). A - Balayage sur l'axe vertical. B – Carte de densité d'une recherche avec un balayage principalement sur l'axe horizontal. C – Carte de densité d'une exploration des cercles concentriques. D – Mouvements ordonnés le long de l'axe horizontal puis vertical suivant l'ordre de transmission des deux indices tactiles. E – Carte de densité d'un mouvement commençant essentiellement par l'axe horizontal. F- Carte de densité d'un mouvement intégré. Ici, le sujet a été capable d'intégrer les deux coordonnées avant de bouger, puis de déplacer la tête en faisant des mouvements obliques vers les cibles. Chaque carte de densité représente les mouvements de tête d'un sujet pendant un essai. La position de la cible et les mouvements de tête ont été normalisés avec une transformation symétrique sur l'axe horizontal puis vertical, en plaçant les cibles dans le coin supérieur droit. Le rouge indique des densités élevées et le bleu foncé l'absence de position de tête.

Nous avons calculé les temps de recherche médians par sujet et par technique. Les moyennes de ces temps de recherche médians sont présentées dans la Figure 6A. Les sujets passaient en moyenne 16,8±2,5 secondes pour trouver une cible dans la condition contrôle ; et 5,4±0,8 secondes avec des indices tactiles. Nous avons observé une différence similaire pour chaque sujet. La différence est très significative (test-t, $p<0,001$). Nous avons également calculé la distance médiane parcourue par sujet et par condition. Chaque distance a été comparée à la distance optimale (distance la plus courte entre la position de la cible et la position initiale du sujet). En condition contrôle, la distance médiane était en moyenne dix fois plus importante que la distance optimale (cf. Figure 6B). Avec des indices tactiles, ce ratio est en moyenne de 1,2±0,2. Nous avons observé un ratio similaire pour tous les sujets. Par conséquent, l'analyse a montré une différence très significative (test-t $p<0,001$). Nous n'avons observé aucune amélioration de leur temps de recherche, ni de la distance parcourue, que ce soit dans les conditions contrôle ou tactile.

Une des erreurs observées avec la technique d'assistance était liée à l'inversion de la direction sur les axes. Nous avons calculé les erreurs d'inversion selon une règle simple. Une erreur est détectée lorsque la tête se déplace dans la direction opposée, et atteint le seuil de cinq degrés d'angle visuel. En moyenne, les sujets ont fait 4,5±3,3 % (resp. 8,8±4,0 %) d'erreurs d'inversion sur l'axe horizontal (resp. vertical). Le score de satisfaction (SUS) pour la technique d'assistance était en moyenne de 82±16, ce qui est considéré comme «bon» [4].

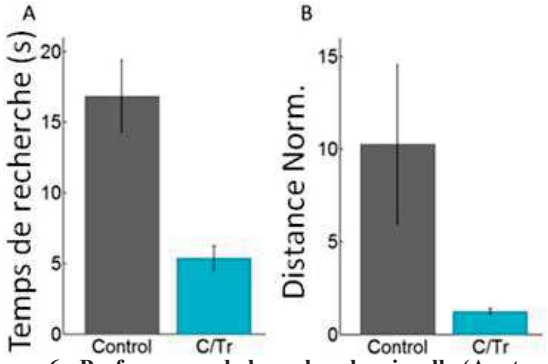

Figure 6 : Performance de la recherche visuelle (A – temps de recherche et B- distance parcourue) avec et sans indices tactiles. En gris, la condition contrôle sans indices ; en cyan, la technique d'assistance (C/Tr, voir expérience 1).

Conclusions de la deuxième expérience

L'expérience a montré que le recherche visuelle avec une assistance tactile était en moyenne trois fois plus courte. De plus, l'assistance tactile était fiable et satisfaisante. L'expérience a donc clairement démontré l'utilisabilité de la technique pour assister une recherche visuelle dans un environnement visuellement encombré.

EXP 3 : ETUDE DE CAS SUR UN SUJET AVEC UNE VISION TUBULAIRE

Dans cette dernière expérience, nous avons souhaité vérifier que les résultats observés avec une simulation sont vrais pour des utilisateurs déficients visuels. Nous avons donc répété l'expérience avec un sujet ayant un champ visuel restreint dû à un glaucome.

Participant

Un homme de 47 ans a réalisé cette expérience complémentaire. Il s'est porté volontaire suite à une annonce passée dans un centre d'éducation spécialisée pour déficients visuels (IJA). Il a donné son consentement éclairé par écrit avant de participer à l'étude conformément à la Déclaration d'Helsinki. Le sujet présentait un champ visuel bilatéral de 10° x 15°. Ce sujet avait une perception altérée des couleurs et une adaptation lente à la luminosité, ce qui est souvent observé chez ces patients [43].

Environnement virtuel, dispositif tactile et cibles

Le sujet était placé dans les mêmes conditions que précédemment, excepté les points suivants. La couleur de la cible a été changée en un dégradé de couleur (du jaune au blanc), et la transparence a été supprimée. Dans le but de réduire l'inconfort dû aux changements de luminosité, nous l'avons gardée constante pendant toute l'expérience. Évidemment, le champ visuel n'était pas artificiellement réduit par un masque noir.

Procédure expérimentale

La procédure était la même que dans l'expérience précédente, à l'exception que la lumière n'était jamais éteinte pendant les essais. Le sujet a tout d'abord réalisé une série de trente essais (dont dix pour se familiariser) sans assistance tactile. Puis, il a réalisé une série de trente-cinq essais (dont quinze pour se familiariser) avec assistance tactile.

Résultats

Nous avons calculé la durée médiane pour trouver la cible avec et sans indices tactiles. Elle était significativement réduite avec les indices tactiles (9,4s) comparée à la condition contrôle (27,3 s) (Wilcoxon $p<0,001$). Le score de satisfaction (SUS) pour la technique d'assistance était de 72,5, ce qui est considéré comme «bon» [4].

Enfin, la discussion ouverte avec l'utilisateur nous a permis de recueillir des résultats qualitatifs. Celui-ci a notamment remarqué que « c'est vraiment une technique prometteuse » qui va « l'aider à localiser un objet ». Si elle était disponible, il s'en « servirait régulièrement ». Il a aussi précisé qu'il a « eu parfois quelques difficultés à détecter les vibrations », et que, par conséquent, « il faudrait ralentir la fréquence des trains de stimulations ».

DISCUSSION

Dans la première expérience, nous avons conçu quatre codes tactiles différents transmis par un seul vibreur fixé au poignet. Les indices d'anticipation étaient transmis avant tout mouvement de tête, et visaient à fournir l'assistance pour localiser une cible dans un espace frontal. La première observation est que tous ces codes permettent à l'utilisateur d'estimer correctement la position d'une cible dans un repère égocentrique lié à l'orientation de la tête, ce qui est similaire à la façon dont la mémoire peut stocker des informations spatiales [41]. Toutefois, la comparaison directe de ces quatre techniques dans une tâche d'orientation de la tête avec une vision tubulaire artificielle a montré qu'une succession de pulsations transmise dans un système de coordonnées cartésien était la plus efficace et la plus satisfaisante. Dans cette technique, deux trains de pulsations correspondent à l'abscisse et l'ordonnée de la cible relatives à l'orientation courante de la tête. Et, un nombre croissant de pulsations dans le train indique que la portion recherchée de l'espace est plus éloignée de la position actuelle.

Dans l'expérience suivante, nous avons évalué cette technique, considérée comme la plus efficace et la plus satisfaisante, dans une situation la plus écologique possible. Ainsi, les sujets avaient un champ visuel équivalent à une vision tubulaire de 10°. Ils devaient trouver une petite cible dans un salon encombré. Les sujets portaient un dispositif tactile conçu par nos soins, composé de quatre vibreurs répartis autour du poignet. Nous avons choisi d'associer une direction par vibreur (Haut, Bas, Gauche, Droite) et un axe par paire de vibreurs (vertical vs. horizontal). L'évaluation de la technique a montré l'efficacité de ce design puisqu'il a permis une estimation très efficace de la localisation de la cible dans un environnement surchargé. Encore une fois, il est important de noter que ce n'est pas une technique de guidage mais d'anticipation. L'information est fournie de façon brève, avant tout mouvement, et permet d'estimer la position de la cible dans un repère centré sur la tête. La recherche visuelle, réalisée dans un environnement encombré, était trois fois plus rapide avec les indices d'anticipation qu'en leur absence. La distance parcourue pour trouver la cible était aussi dix fois plus courte avec les indices. De plus, tous les sujets testés ont montré une réduction significative du temps de recherche et de la distance parcourue. Une autre observation importante est que les directions étaient dans la grande majorité des cas (>90%) correctement interprétée, ce qui suggère d'une part que le bracelet permet une bonne discrimination des vibreurs autour du poignet, mais aussi que le code que nous avons utilisé est facile à décoder.

Comme nous l'avons mentionné, le choix de la durée des stimulations tactiles a été basé sur des pré-tests succincts permettant de se situer dans une zone de discriminabilité confortable. Au niveau physiologique, la discrimination temporelle entre deux stimulations d'une même partie du corps est en moyenne entre 25 ms et 40 ms [28]. Il serait donc possible d'envisager de raccourcir le temps de

stimulation. Cependant nous avons noté que le ressenti des utilisateurs était très variable. Les sujets voyants (expériences 1 et 2) n'ont fait aucun commentaire sur une éventuelle optimisation des stimulations, alors que le sujet déficient visuel (expérience 3) aimerait les ralentir. Il est probable que de nombreux facteurs influencent la perception des stimuli tactiles (déficience visuelle éventuelle mais aussi fatigue, âge etc.). Il serait donc nécessaire de réaliser une étude systématique permettant d'optimiser la durée et la fréquence des stimuli. Nous pourrions aussi imaginer un système dans lequel l'utilisateur peut aisément choisir ces deux paramètres.

Au cours de l'expérience, nous n'avons pas observé une augmentation ou une diminution des performances de la recherche visuelle entre les essais. Cette observation signifie que l'utilisateur avait besoin de moins de quinze essais, correspondant à la phase de familiarisation, pour atteindre un bon niveau de performance. Cela suggère un apprentissage rapide du code tactile. Enfin, bien que notre prototype soit rustique et bon marché (quatre vibreurs attachés avec un bandage), il a été de façon surprenante très apprécié. Avec des scores de satisfaction et d'efficacité très bons, il apparaît que ce dispositif, destiné aux personnes ayant un champ visuel restreint, pourrait être très utilisable pour transmettre une connaissance a priori de cibles environnantes. Une première amélioration de notre approche serait d'augmenter sa portée, i.e. d'indiquer la position d'objets dans une zone plus large, voire de 360° autour de l'utilisateur. Afin d'accroître les performances de l'approche nous nous focaliserons sur la réduction du temps de transmission des coordonnées tout en conservant la bonne discriminabilité des vibreurs. La diminution de la durée des vibrations et des intervalles serait une bonne piste, mais il y en a d'autre comme par exemple la parallélisation du message avec de la multimodalité ou encore améliorer la version stimuli continu afin de gagner en précision.

Il était cependant important de valider notre approche sur un sujet déficient visuel. Différentes études comportementales ont déjà montré que cette même approche est fiable dans des tâches de cognition spatiale [17,18,47]. Néanmoins, les personnes avec une vision tubulaire peuvent présenter d'autres déficits tels que la faible détection des contrastes, la confusion des couleurs, ou la perte de l'acuité visuelle [20,52]. Or ces déficits ne sont pas simulés dans cette simulation. Ils peuvent également développer des stratégies particulières pour la recherche visuelle lors de la perte progressive de leur champ visuel. Ces stratégies peuvent entraver les résultats que nous avons observés dans cette expérience. Par conséquent, nous avons évalué le dispositif sur un sujet ayant un champ visuel restreint en raison d'un glaucome. Son champ visuel était cohérent avec la simulation, mais sa capacité à détecter les couleurs était aussi altérée. Nos résultats montrent qu'avec des indices d'anticipation, il était trois fois plus rapide pour trouver une cible. Le ratio est similaire à celui observé avec la simulation, bien que le sujet déficient visuel soit légèrement moins rapide pour trouver les cibles dans les deux conditions. Une capacité plus faible de détection des contrastes et des couleurs pourrait expliquer cette différence. Au cours du débriefing, le sujet déficient visuel mentionnait qu'une partie de son attention était portée sur la discrimination des vibreurs actifs. Toutefois, le sujet a montré un grand intérêt pour le dispositif d'assistance et le score (72,5) qu'il a donné confirme sa satisfaction. Néanmoins, la suppression de la transparence a probablement augmenté l'effet «pop out» de la cible et faciliter sa détection. Cependant dans l'expérience 3, l'effet pop-out était identique dans les deux conditions. Et après une analyse supplémentaire, le pourcentage de réduction en terme de durée entre la condition contrôle et la technique d'assistance observé dans les exp. 2 et 3 était similaire (67% pour l'exp. 2 et 65% pour l'exp. 3), ce qui confirme l'hypothèse que la diminution du temps de recherche dans l'exp. 3 est bien due aux informations tactiles.

La prochaine étape consistera à tester l'utilisabilité du dispositif en situation réelle. Il peut facilement être intégré dans des lunettes intelligentes actuellement en développement (i.e. Google Glass®) ou même commercialisées (OrCam®). Tous ces dispositifs sont capables de reconnaître et localiser des cibles d'intérêts, et de calculer leur position relative à celle de la tête. Les algorithmes de vision par ordinateur sont en constante progression, et reconnaissent déjà des visages ou des objets avec précision. Il est possible de distinguer des milliers d'objets sur la base d'images en temps réel [11]. Ces cibles d'intérêt pourraient être détectées soit sur demande grâce à des commandes vocales, soit être suggérées par le dispositif de façon automatique (par ex. des obstacles potentiels ou des cibles récurrentes), ce qui améliorerait la cognition spatiale de l'utilisateur. Une version commerciale de notre bracelet tactile pourrait facilement être intégrée dans le bracelet d'une « smartwatch » et communiquer par Bluetooth. Une étude récente a notamment mis en évidence l'intérêt croissant que les personnes déficientes visuelles portent aux smartphones et autres appareils portables [51]. Il est également intéressant de noter qu'en plus de la recherche visuelle, un dispositif tactile sur le poignet pourrait être utile dans d'autres situations quotidiennes problématiques pour les déficients visuels, comme la navigation piétonne [6] ou le transport [8].

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Louis-Pierre Bergé, Gary Perelman et Victor Vergnieux pour l'aide précieuse lors de l'élaboration des tâches comportementales. Ce travail a été financé par des subventions du CNRS-INSB et UNADEV.

BIBLIOGRAPHIE

1. Auvray, M., Hanneton, S., and O'Regan, J.K.Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: localisation and object recognition with 'the vOICe'. *Perception 36*, 3 (2007), 416–30.
2. Bach-Y-Rita, P., Collins, C.C., Saunders, F.A., White, B., and Scadden, L.Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature 221*, 5184 (1969), 963–964.
3. Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K.A., Tyler, M.E., and Garcia-Lara, J.Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue: a technical note. *Journal of rehabilitation research and development 35*, 4 (1998), 427–430.
4. Bangor, A., Kortum, P.T., and Miller, J.T.An Empirical Evaluation

of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, (2008), 574–594.
5. Brewster, S.S. a. and Brown, L.M.L.M.Tactons: structured tactile messages for non-visual information display. *Proceedings of the fifth conference on Australasian user interface (AUIC '04)*, Australian Computer Society, Inc. (2004), 15–23.
6. Brock, A., Kammoun, S., Macé, M., and Jouffrais, C.Using wrist vibrations to guide hand movement and whole body navigation. *I-Com 13*, 3 (2014), 19–28.
7. Brooks, D.I., Rasmussen, I.P., and Hollingworth, A.The nesting of search contexts within natural scenes: evidence from contextual cuing. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance 36*, 6 (2010), 1406–18.
8. Brunet, L., Megard, C., Panëels, S.A., et al.'Invitation to the voyage': The design of tactile metaphors to fulfill occasional travelers' needs in transportation networks. *2013 World Haptics Conference, WHC 2013*, IEEE (2013), 259–264.
9. Cassinelli, A., Reynolds, C., and Ishikawa, M.Augmenting spatial awareness with Haptic Radar. *2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, IEEE (2006), 61–64.
10. Chen, H., Santos, J., Graves, M., Kim, K., and Tan, H.Z.Tactor localization at the wrist. *Proceedings of the EuroHaptics 2008 Conference*, (2008), 209–218.
11. Dean, T., Ruzon, M.A., Segal, M., Shlens, J., Vijayanarasimhan, S., and Yagnik, J.Fast, Accurate Detection of 100,000 Object Classes on a Single Machine. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013 IEEE Conference on*, (2013), 1814–1821.
12. Dramas, F., Oriola, B., Katz, B.F.G., Thorpe, S.J., and Jouffrais, C.Designing an assistive device for the blind based on object localization and augmented auditory reality. *Proceedings of the 10th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - Assets '08*, (2008), 263–264.
13. Van Erp, J.Presenting directions with a vibrotactile torso display. *Ergonomics 48*, 3 (2005), 302–13.
14. Van Erp, J.B.F., Van Veen, H.A.H.C., Jansen, C., and Dobbins, T.Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt. *ACM Transactions on Applied Perception 2*, 2 (2005), 106–117.
15. Fiannaca, A., Morelli, T., and Folmer, E.Haptic target acquisition to enable spatial gestures in nonvisual displays. *Proceedings of Graphics Interface 2013*, (2013), 213–219.
16. Folmer, E. and Morelli, T.Spatial gestures using a tactile-proprioceptive display. *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction 1*, (2012), 139–142.
17. Fortenbaugh, F.C., Hicks, J.C., Hao, L., and Turano, K. a.Losing sight of the bigger picture: peripheral field loss compresses representations of space. *Vision research 47*, 19 (2007), 2506–20.
18. Fortenbaugh, F.C., Hicks, J.C., and Turano, K. a.The effect of peripheral visual field loss on representations of space: evidence for distortion and adaptation. *Investigative ophthalmology & visual science 49*, 6 (2008), 2765–72.
19. Fox, C.R.Low vision rehabilitation for patients with severe glaucoma. In *Principles and Practice of Ophthalmology*. 2000, 3031–3043.
20. Gawande, a a, Donovan, W.J., Ginsburg, a P., and Marmor, M.F.Photoaversion in retinitis pigmentosa. *The British journal of ophthalmology 73*, 2 (1989), 115–120.
21. Geldard, F. a.Adventures in tactile literacy. *American Psychologist 12*, 3 (1957), 115–124.
22. Grover, S., Fishman, G.A., and Brown, J.Patterns of visual field progression in patients with retinitis pigmentosa. *Ophthalmology 105*, (1998), 1069–1075.
23. Henriques, D.Y.P., Medendorp, W.P., Khan, A.Z., and Crawford, J.D.Visuomotor transformations for eye-hand coordination. *Progress in brain research 140*, (2002), 329–40.
24. Henze, N., Heuten, W., and Boll, S.Non-intrusive somatosensory navigation support for blind pedestrians. *Proc of Eurohaptics*, (2006), 459–464.
25. Herse, P.Retinitis pigmentosa: visual function and multidisciplinary management. *Clinical & experimental optometry : journal of the Australian Optometrical Association 88*, 5 (2005), 335–50.
26. Heuten, W., Henze, N., Boll, S., and Pielot, M.Tactile wayfinder: a non-visual support system for wayfinding. *Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction building bridges - NordiCHI '08*, ACM, New York, NY, USA (2008), 172–181.
27. Hoggan, E., Crossan, a., Brewster, S. a., and Kaaresoja, T.Audio or tactile feedback: which modality when? (2009), 2–5.
28. Hoshiyama, M., Kakigi, R., and Tamura, Y.Temporal discrimination threshold on various parts of the body. *Muscle and Nerve 29*, 2 (2004), 243–247.
29. Jones, C.M., Gray, R., Spence, C., and Tan, H.Z.Directing visual attention with spatially informative and spatially noninformative tactile cues. *Experimental brain research 186*, 4 (2008), 659–69.
30. Katz, B.F.G., Dramas, F., Parseihian, G., et al.NAVIG: Guidance system for the visually impaired using virtual augmented reality. *Technology and Disability 24*, 2 (2012), 163–178.
31. Katz, B.F.G., Kammoun, S., Parseihian, G., et al.NAVIG: Augmented reality guidance system for the visually impaired: Combining object localization, GNSS, and spatial audio. *Virtual Reality 16*, 4 (2012), 253–269.
32. Kozlowski, J.M.D. and Jalkh, A.E.An Improved Negative-Lens Field Expander for Patients With Concentric Field Constriction. *Archives of Ophthalmology 103*, 3 (1985), 326–326.
33. Krefman, R.A.Reversed telescopes on visual efficiency scores in field-restricted patients. *American journal of optometry and physiological optics 58*, 2 (1981), 159–62.
34. Kuyk, T.K., Liu, L., and Fuhr, P.S.W.Feature search in persons with severe visual impairment. *Vision Research 45*, (2005), 3224–3234.
35. Lehtinen, V., Oulasvirta, A., Salovaara, A., and Nurmi, P.Dynamic tactile guidance for visual search tasks. *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '12*, (2012), 445.
36. Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C., and Genouëlle, C.Sensory substitution: limits and perspectives. In *Touching for knowing: cognitive psychology of haptic manual perception*. Yvette, Hatwell, 2003, 320.
37. Lindeman, R., Yanagida, Y., Sibert, J.L., and Lavine, R.Effective vibrotactile cueing in a visual search task. *Proceedings of the ninth IFIP TC13 international conference on Human-computer interaction (INTERACT 2003)*, (2003), 89–96.
38. Lowe, J. and Drasdo, N.Patient's Responses to Retinitis Pigmentosa. *Optometry & Vision Science 69*, 3 (1992), 182–185.
39. Makous, J.C., Friedman, R.M., and Vierck, C.J.A critical band filter in touch. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience 15*, April (1995), 2808–2818.
40. Matscheko, M., Ferscha, A., Riener, A., and Lehner, M.Tactor placement in wrist worn wearables. *International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2010*, (2010), 1–8.
41. Medendorp, W.P., Beurze, S.M., Van Pelt, S., and Van Der Werf, J.Behavioral and cortical mechanisms for spatial coding and action planning. *Cortex 44*, (2008), 587–597.
42. Nakashima, R. and Shioiri, S.Why do we move our head to look at an object in our peripheral region? Lateral viewing interferes with attentive search. *PLoS ONE 9*, 3 (2014).
43. Nelson, P., Aspinall, P., and O'Brien, C.Patients' perception of visual impairment in glaucoma: a pilot study. *The British journal of ophthalmology 83*, 5 (1999), 546–552.
44. Ngo, M.K. and Spence, C.Auditory, tactile, and multisensory cues facilitate search for dynamic visual stimuli. *Attention, perception & psychophysics 72*, 6 (2010), 1654–65.
45. Oron-Gilad, T., Downs, J.L., Gilson, R.D., and Hancock, P. a.Vibrotactile Guidance Cues for Target Acquisition. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews) 37*, 5 (2007), 993–1004.
46. Smith, N.D., Crabb, D.P., and Garway-Heath, D.F.An exploratory study of visual search performance in glaucoma. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists) 31*, 3 (2011), 225–32.
47. Turano, K. a., Yu, D., Hao, L., and Hicks, J.C.Optic-flow and egocentric-direction strategies in walking: Central vs peripheral visual field. *Vision Research 45*, 25-26 (2005), 3117–3132.
48. Vargas-Martin, F. and Peli, E.Augmented-view for restricted visual field: multiple device implementations. *Optometry & Vision Science 79*, 11 (2002), 715–723.
49. Wolfe, J.M.What can 1,000,000 trials tell us about visual search? *Psychological Science 9*, 1 (1998), 33–39.
50. Woods, R.L., Giorgi, R.G., Berson, E.L., and Peli, E.Extended wearing trial of Trifield lens device for 'tunnel vision.' *Ophthalmic and Physiological Optics 30*, 3 (2010), 240–252.
51. Ye, H., Malu, M., Oh, U., and Findlater, L.Current and Future Mobile and Wearable Device Use by People With Visual Impairments. *CHI 2014*, (2014), 3123–3132.
52. Young, R.S.L. and Fishman, G.A.Sensitivity losses in a long wavelength sensitive mechanism of patients with retinitis pigmentosa. *Vision Research 22*, 1 (1982), 163–172.