

Université de Montréal

L'UTILISATION DES SONS SPATIALISÉS HORIZONTALEMENT EN TANT QU'AIDE À LA NAVIGATION
CHEZ DES AVEUGLES PRÉCOCES ET TARDIFS.

Par

Samuel Paré

École d'optométrie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Maîtrise
en sciences de la vision, option sciences fondamentales, appliquées et cliniques

Août 2020

© Samuel Paré, 2020

Université de Montréal

Faculté des études supérieures et postdoctorale, École d'optométrie

Ce mémoire intitulé

**L'UTILISATION DES SONS SPATIALISÉS HORIZONTALEMENT EN TANT QU'AIDE À LA
NAVIGATION CHEZ DES AVEUGLES PRÉCOCES ET TARDIFS.**

Présenté par

Samuel Paré

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Vasile Diaconu, Ph.D.

Président-rapporteur

Maurice Ptito, MD, Ph.D.

Directeur de recherche

Ron Kupers, Ph.D.

Membre du jury

Résumé

La vision est le sens privilégié pour interagir avec notre environnement. C'est pourquoi le système visuel prend plus d'un tiers du cortex cérébral. Lorsqu'un individu perd sa vision, ce système est dépourvu de sa source première de stimuli. Il subit donc une réorganisation neuronale massive et devient un espace intermodal. Pour ce faire, il recrute des afférences des autres modalités afin que celles-ci prennent en charge les fonctions qui sont normalement soutenues par la vision. Ce phénomène, appelé plasticité cérébrale, est stimulé par la durée de la cécité et par l'entraînement des sens fonctionnels. Ceci fait en sorte que les aveugles développent des supra-capacités dans les modalités fonctionnelles. La substitution sensorielle est un principe qui exploite ce phénomène. Celle-ci permet de substituer un sens déficient par un autre sens. Pour ce faire, des appareils de substitution sensorielle sont développés pour acheminer des informations visuelles via le toucher ou l'audition. Bien que le but de ces appareils est d'offrir une vision fonctionnelle aux aveugles, la problématique principale demeure l'indépendance de navigation des aveugles. Cependant, ces appareils sont très peu appréciés par les aveugles parce qu'ils sont inaccessibles et qu'ils fournissent un signal complexe qui demande un entraînement intense et une charge cognitive trop élevée.

Dans ce projet, nous avons évalué le potentiel d'un nouvel appareil de substitution sensorielle qui fournit des informations strictement pertinentes à la navigation spatiale sous la forme de sons spatialisés horizontalement. Pour ce faire, des participants aveugles précoces, aveugles tardifs et des voyants aux yeux bandés ont été testés pour leurs habiletés à détecter et éviter des obstacles à l'aide de l'appareil dans des conditions expérimentales de détection et d'évitement d'obstacles. L'étude a démontré qu'il est possible d'utiliser cet appareil en tant qu'aide à la navigation et que ce système est utilisé plus efficacement par les groupes d'aveugles.

Mots-clés : substitution sensorielle, navigation spatiale, cécité, plasticité intermodale, audition.

Abstract

Vision is the preferred sense for interacting with our environment. This is why the visual system takes up more than a third of the cerebral cortex. When an individual loses his vision, this system misses its primary source of stimuli. It therefore undergoes a massive neuronal reorganization and becomes an intermodal space. To do so, it recruits afferents from other modalities so that they take over the functions that are normally mediated by vision. This phenomenon, known as cerebral plasticity, is stimulated by the experience of blindness as well as by the training of the functional senses. This causes the blind to develop supra-abilities in their functional modalities. Sensory substitution is a principle that exploits this phenomenon. It makes it possible to substitute a deficient modality with another modality. To help the blind, sensory substitution devices are being developed to convey visual information via touch or hearing. Although these devices attempt to provide functional vision for the blind, the main issue they try to address is the improvement of the navigational independency of the blind. However, these devices are very little appreciated by the blind since they are inaccessible and provide a complex signal that requires intense training and too high of a cognitive load.

Therefore, in this project, we evaluated the potential of a new sensory substitution device that provides information strictly relevant to spatial navigation in the form of horizontally spatialized sounds. To do so, early blind, late blind and sighted blindfolded individuals were tested for their ability to detect and avoid obstacles using the device under experimental conditions. The study showed that it is possible to use this device as a navigation aid and that this system is used more effectively by the blind.

Keywords : sensory substitution, spatial navigation, blindness, cross-modal plasticity, audition.

Table des matières

Résumé	5
Abstract	7
Table des matières	9
Liste des tableaux.....	11
Liste des figures.....	13
Liste des sigles et abréviations.....	15
Remerciements	19
Introduction	21
1 - Plasticité cérébrale	21
1.1 Plasticité dans le temps	22
1.2 Plasticité compensatoire	22
1.3 Hypertrophie compensatoire	24
1.4 Plasticité intermodale.....	25
2 - Le cerveau « aveugle »	26
2.1 Le Toucher	27
2.2 L'audition	28
2.2.1 Traitement du langage	29
2.2.2 Traitement des fréquences sonores	29
2.2.3 Traitement spatial des sons	30
2.3 Sens chimiques et traitement de la douleur.....	32
2.3.1 Olfaction.....	32
2.3.2 Gustation.....	33
2.3.3 Traitement de la douleur	33
2.4 Psychophysique des sens résiduels	33
3 - Navigation spatiale	35
3.1 Cognition spatiale et développement	37
3.2 Base neuronales de la navigation	39

3.2.1 L'hippocampe, les place cells et les head-direction cells	39
3.2.2 Complexe parahippocampique et les grid cells	41
3.2.3 Intégration, planification et exécution de la navigation	42
3.3 Cécité et navigation spatiale.....	43
4 – Substitution sensorielle	45
4.1 L'héritage de Paul Bach-y-Rita	45
4.2 Appareils de substitution sensorielle.....	47
4.2.1 Tongue Display Unit (TDU)	47
4.2.2 Le vOICe	48
4.3 Attribution distale.....	50
4.4 Substitution sensorielle en tant qu'aide à la navigation.....	51
4.4.1 Aides à la navigation	51
4.4.2 SSDs et navigation en situations expérimentales	52
5. Problématique, objectifs et hypothèses de recherche.....	53
5.1 Problématique	53
5.1.1 La complexité des SSDs	53
5.1.2 Les limitations des appareils et leur inaccessibilité	54
5.1.3 Nouveaux développement de SSDs	55
5.2 Objectifs.....	55
5.3 Hypothèses	56
Article	57
Accusé de réception de PloS One.....	58
Discussion	80
1. Discussion des résultats.....	80
1.1 Détection d'obstacles avec le mode Détection	80
1.2 Navigation avec le mode évitement.....	81
2. Substitution sensorielle et apprentissage perceptuel.....	82
3. Perspectives	83
Conclusion.....	84

Liste des tableaux

INTRODUCTION

Tableau 1	33
-----------------	----

ARTICLE

Table 1	63
---------------	----

Liste des figures

INTRODUCTION

Figure 1	32
Figure 2	39
Figure 3	46
Figure 4	47
Figure 5	49

ARTICLE

Figure 1	65
Figure 2	67
Figure 3	69
Figure 4	70

Liste des sigles et abréviations

AP : Aveugle(s) précoce(s)

AT : Aveugle(s) tardif(s)

BDI : Blind duration index

CGL : Corp(s) genouillé(s) latéral(aux)

CV : Contrôles voyants

HIP : Hippocampe

IRM : Imagerie en résonance magnétique

IRMf : Imagerie en résonance magnétique fonctionnelle

O&M : Orientation et mobilité

P-HIP : Complexe parahippocampique

PLT : Potentialisation à long terme

RTMS : Repetitive transcranial magnetic stimulation / stimulations magnétique transcrânienne

SSD : Sensory substitution device(s) / Appareil(s) de substitution sensorielle

TEP / PET : Tomographie à émission de positrons / Positron emission tomography

TDU : *Tongue Display Unit*

TV-SSD : *Touch to Vision Sensory Substitution Device*

VA-SSD : *Visual to Auditory Sensory Substitution Device*

Remerciements

Tout d'abord, le plus gros merci à Maurice, mon superviseur de Maîtrise. Merci de m'avoir accepté dans votre laboratoire renommé et de m'avoir guidé en tant qu'étudiant. Votre positivisme et votre humour ensoleillent nos journées. Vous êtes toujours présent pour nous aider, nous conseiller ou nous écouter. Vous avez une si grande confiance en vos étudiants qu'il est impossible de ne pas être motivé sous votre supervision. Je suis excité d'entreprendre mon doctorat avec vous.

Deuxièmement, merci énormément à Ron. Non seulement vous m'avez conseillé durant tout mon parcours, vous m'avez aussi accueilli dans votre superbe appartement à Copenhague. Cet été passé chez vous a été une expérience formidable que je vais me rappeler toute ma vie. J'ai hâte de travailler avec vous pour des projets futurs.

Ensuite, Ismaël et Maxime, les boys, sans vous je n'y serais jamais arrivé. Vous avez été là dès le jour 1 pour m'accueillir et vous êtes encore là pour m'aider. C'est un projet qu'on a bâti ensemble et j'espère sincèrement que ça ne sera pas le dernier.

Papa, Maman, merci de toujours croire en moi et de toujours m'encourager. Je vous aime et si je suis rendu où je suis en ce moment c'est grâce à vous.

Finalement, Justine, félicitations de m'avoir enduré 24/7 pendant le confinement même si je peux être le plus fatiguant. Tu m'encourages toujours à sortir le meilleur de moi-même et à ne jamais abandonner. Je te promets que je vais t'encourager et te soutenir comme tu l'as fait pour moi, même si je risque d'être un chum autant fatiguant que je l'aie été pendant le confinement.

Introduction

1 - Plasticité cérébrale

Le cerveau est assurément l'organe le plus complexe de tout être vivant. Ses 86 milliards de neurones, dont chacun peut faire des millions de synapses avec ses voisins (Azevedo et al., 2009), témoignent de son unicité. Une des raisons qui rend l'étude de celui-ci aussi unique est sa capacité à se remodeler et à s'adapter en fonction de son expérience et de son environnement. Ce pouvoir de neuroplasticité est crucial au développement du système nerveux, à son apprentissage et à sa capacité de récupérer à la suite d'une lésion.

Grâce à cette malléabilité, le cerveau est capable de s'adapter localement par des mécanismes intramodaux. Comme cette célèbre phrase dit : « Neurons that fire together, wire together », les neurones qui s'activent selon un décours spatial et temporel concordant, vont créer des synapses entre eux ou renforcer celles déjà existantes. On parle alors d'une ouverture spatiale et temporelle selon laquelle les décharges des neurones présynaptiques vont moduler l'expression des récepteurs de la cellule post-synaptique. Cette modulation peut se traduire soit en une augmentation de la sensibilité aux décharges présynaptique, dite potentialisation à long terme (PLT), ou en une désensibilisation, dite dépotentialisation à long terme (DLT). Concomitant à l'activité neuronale, une organisation spécifique de synapses PLT et DLT se forme sur le neurone post-synaptique harmonisant sa capacité d'analyse de l'influx nerveux avec son expérience (Bliss & Lømo, 1973; Gustafsson & Wigstrom, 1986). De plus, cette plasticité affecte directement la morphologie des neurones. En 2002, une étude a démontré que les neurones d'un rat élevé dans un environnement enrichi (jeux et ambiance sociale) développent de plus larges arborisations dendritiques, favorisant alors un plus grand nombre de connexions avec ses voisins. Un rat de cette même souche qui est élevé dans un environnement appauvri (avec moins de stimulations), développera de moins larges arborisations dendritiques et aura un nombre réduit de connexions synaptiques (Johansson & Belichenko, 2002).

Ces modifications sont au cœur de l'apprentissage et de la mémoire. En effet, ces concepts dépendent de cette plasticité synaptique. Par exemple, lors de l'entraînement, ces concepts de

plasticité intra-modale sont appliqués sur des réseaux de neurones pour que ceux-ci apprennent et stockent les nouvelles informations. Lorsque des stimuli vont activer ces mêmes réseaux neuronaux avec un patron similaire à celui au moment où ils étaient en apprentissage, ils récupèrent l'information de leurs expériences précédentes et c'est alors qu'on parle de mémoire (Lynch, 2004).

1.1 Plasticité dans le temps

Bien que cette plasticité soit présente pendant toute la vie, sa puissance dans le temps varie selon les structures. Chacun a une période temporelle spécifique nommé la « période critique » durant laquelle la plasticité atteint son plein potentiel. C'est lors de cette période que l'environnement parvient à influencer grandement le développement du système. Par conséquent, un contexte anormal peut causer un développement déficient. Par exemple, dans le cortex visuel, une privation monoculaire dans les premières vingt-cinq semaines de vie modifie l'organisation corticale normale des colonnes binoculaires en favorisant l'œil qui a eu un développement normal, alors que l'œil précédemment occlus atrophiera ses projections se rendant au corps genouillé latéral (CGL). D'ailleurs, il répondra moins efficacement aux stimuli et sera sous-représenté au niveau du système visuel. En revanche, lorsque la privation monoculaire est faite à l'âge adulte, aucun changement n'est aperçu au niveau de l'œil, de ses projections et de l'organisation binoculaire au niveau du cortex occipital (Drager, 1978; Hubel & Wiesel, 1970; Hubel et al., 1977). Cette période critique varie entre chaque organisation neuronale. Dans le système visuel, la maturation des photorécepteurs, la préférence aux orientations, l'établissement des colonnes binoculaires et la stéréopsie vont tous progresser selon des cadences différentes (Harwerth et al., 1986).

1.2 Plasticité compensatoire

Cette neuroplasticité joue un rôle important lors de la récupération face à une ou des lésions. Lorsqu'un trauma survient, cette plasticité dite compensatoire permet d'adapter la

structure traumatique ou de créer de nouveaux réseaux de connectivité afin que les structures homologues ou adjacentes puissent prendre en charge la fonction affectée. La récupération atteint toutefois son plein potentiel lorsqu'elle survient le plus tôt possible dans le développement (Kennard, 1942). Un cas fascinant est celui de patients hémisphérectomisés ou callosotomisés. Ces chirurgies consistent à enlever complètement un hémisphère cérébral (hémisphérectomie) ou le déconnecter de l'autre (callosotomie) afin d'éliminer les foyers épileptiques non traitables par les traitements habituels (Bogen et al., 1965; Krynauw, 1950). Étant donné que les fonctions somesthésiques et locomotrices sont normalement assumées par l'hémisphère controlatéral, il serait logique que des déficits moteurs et somatosensoriels controlatéraux à la lésion apparaissent. De façon surprenante, ces individus récupèrent l'habileté locomotrice de leurs membres qui sont normalement pris en charge par l'hémisphère manquant (Devlin et al., 2003). De plus, Olausson et al. ont démontré que des stimuli tactiles et douloureux appliqués sur les membres controlatéraux à l'hémisphérectomie, donc désafférentés, activent l'hémisphère ipsilatéral témoignant d'une plasticité importante (Olausson et al., 2001).

La privation sensorielle est un autre type de lésion. En endommageant l'organe sensoriel et non le cortex, cette altération empêche l'acheminement et, ultimement, l'intégration des stimuli du sens correspondant. Si la déficience survient tôt dans le développement ou si elle est périnatale, elle condamnera le développement normal du système sensoriel correspondant, alors qu'une apparition tardive forcera une réorganisation du système après que les structures soient déjà établies. Cette déficience affecte donc ce système sensoriel de manières différentes dépendamment de son moment d'apparition et de sa durée. Dans des cas de cécité par exemple, le système visuel d'un aveugle précoce (AP) sera complètement différent de celui d'un aveugle tardif (AT) (Kupers & Ptito, 2014). Normalement, l'information visuelle est acheminée au cortex occipital (cortex visuel primaire, V1) par la voie géniculo-striée. Celle-ci origine des rétines, passe par les nerfs optiques, croisent au chiasme et traverse le tractus optique afin d'être acheminée aux CGL du thalamus. De là, elle se rend finalement au cortex visuel primaire par les radiations optiques (Hubel & Wiesel, 1972). Une étude en résonance magnétique (IRM) morphométrique chez des AP effectués dans notre laboratoire soulève une diminution significative de la matière blanche dans toutes les structures de cette voie allant même dans le splénium du corps calleux

et le fascicule inférieur longitudinal. Une diminution significative de matière grise fut aussi observée dans le CGL dorsal du thalamus, le cortex visuel primaire et ses aires extrastriées (Ptito, Schneider, et al., 2008). En conséquence, les changements structurels deviennent une nuisance pour cette modalité sensorielle. Dans le cas d'individus ayant perdu la vision tôt dans leur développement en raison d'une cause traitable comme la cataracte, recevoir à l'âge adulte le traitement ou une chirurgie qui redonne la vision apporte de nombreuses difficultés dans des tâches visuelles. Leur cortex visuel qui s'est atrophié et adapté à ne plus recevoir de stimuli visuels, doit apprendre à analyser ces nouvelles informations comme s'il devait apprendre à voir (Apkarian, 1983; Fine et al., 2003; Gregory, 2003; Von Senden, 1960). À l'inverse, le système visuel d'un AT s'étant développé en tant que voyant doit se réorganiser et apprendre à fonctionner sans aucun stimulus visuel.

Bien qu'au départ cette déficience sensorielle nuise au fonctionnement de l'individu, l'expérience et l'environnement permettent à ce dernier d'adapter ses comportements en plus de découvrir de nouvelles habiletés pour faciliter son quotidien. Par exemple, le braille permet aux individus victimes de déficiences visuelles de lire avec des lettres bossées (Mellor, 2006). Il est bien connu qu'avec de l'entraînement, les aveugles vont utiliser l'écholocalisation passive (sons de l'environnement) pour percevoir leurs alentours alors que certains deviennent experts et développent la capacité de percevoir des objets avec l'écholocalisation active (sons effectués par l'individu même) (Kellogg, 1962). De plus, la perte d'une modalité incite la personne à fonctionner avec ses autres sens en les surentraînant ce qui crée alors des supra-capacités sensorielles. En effet, l'hypothèse de plasticité compensatoire stipule que cet entraînement persistant permet au cortex de se remodeler pour pallier son handicap en hypertrophiant l'aire sensorielle compensatoire ainsi qu'en favorisant une plasticité intermodale dans le cortex déficient.

1.3 Hypertrophie compensatoire

L'hypertrophie est un phénomène qui décrit l'agrandissement d'une partie du cerveau en fonction de son expérience et de son entraînement. L'exemple classique d'hypertrophie est celui des musiciens. Puisque ceux-ci sont surentraînés dans leur domaine, ils vont engendrer le

remodelage de certaines structures corticales et sous-corticales pour améliorer leurs performances musicales. Un violoniste droitier aura une représentation corticale agrandie de sa main gauche comparativement à des individus droitiers qui ne jouent pas de violon (Elbert et al., 1995). Quant aux pianistes expérimentés, ils montrent une augmentation du volume de la matière grise dans des régions associées à l'apprentissage telles que le putamen, l'hippocampe (hip), l'amygdale, le thalamus droit, le gyrus lingual bilatéral et le gyrus temporal supérieur gauche. Conséquemment, ces modifications se font aux dépens d'autres régions. On observe aussi chez ces pianistes une diminution du volume de la matière grise dans le gyrus post-central droit, temporal supérieur droit et supra-marginal (Vaquero et al., 2016).

1.4 Plasticité intermodale

La plasticité intermodale est principalement mise en œuvre lors d'une déficience sensorielle, mais elle est aussi cruciale dans des fonctions de hauts niveaux telles que la mémoire et la navigation. Cette capacité réfère à la réorganisation des réseaux neuronaux permettant le couplage fonctionnel de plusieurs systèmes. Lorsqu'une modalité est déficiente, son expérience et son environnement lui permettent de recruter les modalités intactes dans ses aires associées afin que celles-ci prennent en charge ses fonctions. Cet espace multimodal se fait en démasquant des synapses cortico-corticales qui sont normalement silencieuses et/ou en stimulant la formation de nouvelles connections sous-corticales (Bavelier & Neville, 2002; Müller et al., 2019). À l'inverse, s'il s'agit des aires primaires qui sont lésées, les projections ascendantes de cette modalité ont le pouvoir de se réfugier dans d'autres régions corticales associées à une modalité intacte. Par exemple, lors d'une ablation du cortex visuel chez le hamster fœtal, ses projections visuelles font des synapses fonctionnelles dans les noyaux thalamiques auditif (géniculé médial) et somatosensoriel (ventrobasal) (Frost & Metin, 1985). Ces noyaux relayent l'information visuelle vers les aires sensorielles respectives tout en conservant l'organisation rétinotopique, ce qui permet de conserver le champ visuel normal dans ces structures habituellement auditives ou somatosensorielles. D'autres études ont même démontré que ces régions du cortex répondent à des stimuli visuels tels que les préférences d'orientations, l'analyse du mouvement et les

directions. Aussi, certains neurones deviennent bimodaux, c'est-à-dire qu'ils s'activent autant à des stimuli visuels qu'auditifs (Métin & Frost, 1989; Ptito et al., 2001).

Bien que ces études aient été menées auprès d'animaux, plusieurs indices suggèrent des phénomènes similaires chez l'humain (Kupers & Ptito, 2014). Par exemple, Merabet et son équipe ont montré une activation du cortex occipital à la suite de stimulations tactiles chez des individus voyants aux yeux bandés pendant 5 jours. Cette activation disparaissait seulement 24 heures après avoir rétabli leur vision (Merabet et al., 2008). Tous ces changements neuronaux mènent donc à des différences comportementales chez les déficients auditifs ou visuels comme la majorité des études sur ce sujet et sur la substitution sensorielle l'ont démontrées. Puisque le présent projet de recherche est spécifique à la substitution sensorielle chez des aveugles, la prochaine partie discutera en détails du cerveau aveugle en tant que modèle d'étude pour cette neuroplasticité.

2 - Le cerveau « aveugle »

Sans aucun doute, la vision est l'un des sens les plus importants pour l'humain puisque c'est le premier outil utilisé pour interagir avec l'environnement. Prenant plus d'un tiers du cortex cérébral, le système visuel est impliqué dans plusieurs fonctions : motrices, navigation, reconnaissance, etc. De plus, une théorie suggère que la vision est cruciale pour une calibration efficace des autres modalités sensorielles (Axelrod, 1959; Lewald, 2002; Zwiers et al., 2001). Sans aucun doute, la perte de vision affecte énormément le fonctionnement et le développement d'un individu. L'expérience sans vision qu'il acquiert cause donc une réorganisation massive du système visuel, mais aussi de tout le cortex. Ces augmentations de volume de certains réseaux et cette plasticité intermodale provoqueraient-elles des améliorations dans les performances des modalités intactes? L'atrophie des aires sensorielles déprimées empêcherait-elle l'individu d'effectuer des tâches associées à ce sens déficient? Un pionnier du domaine de la plasticité intermodale, mon superviseur Dr. Maurice Ptito, m'a un jour dit : « *The blind brain is not a disabled brain, but a differently abled one* », se traduisant par : *le cerveau aveugle n'est pas déficient, mais plutôt efficient de manières différentes.* »

2.1 Le Toucher

En 1996, Sadato et son équipe ont utilisé la technique de tomographie à émission de positrons (TEP, mieux connue sous le nom de PET) afin de mesurer l'activité corticale d'individus AP lorsqu'ils lisaient le braille. Ils ont remarqué une activation accrue du cortex occipital chez les individus en cécité alors qu'une désactivation de cette région fut observée chez des contrôles voyants (CV) (Sadato et al., 1996). Deux ans plus tard, il démontre que les réseaux neuronaux impliqués dans l'analyse des informations spatiales tactiles amenées par la lecture du Braille sont redirigés vers les régions normalement impliquées dans la discrimination visuelle des formes (lobule pariétal supérieur, gyrus occipital inférieur et les régions occipito-temporales) (Sadato et al., 1998). Bien que ces résultats montrent une association entre les stimuli présentés et l'activation du cortex occipital, ils n'indiquent pas une implication fonctionnelle du système visuel dans l'intégration d'informations tactiles. C'est pourquoi Dr. Ptito et son équipe ont révélé que des stimulations au niveau du cortex occipital avec la technique de stimulation magnétique transcrânienne (SMT, mieux connue pour son acronyme anglophone TMS) engendrent des sensations haptiques dans les doigts des lecteurs de Braille (Ptito, Fumal, et al., 2008) et sur la langue d'AP entraînés avec le Tongue Display Unit (TDU), un appareil de substitution sensorielle linguale (Kupers & Ptito, 2004). Ces résultats démontrent que la représentation corticale (somatotopie) des doigts et de la langue, normalement dans le cortex pariétal, s'est dupliquée dans le cortex occipital (Büchel et al., 1998). La TMS peut aussi être utilisée pour inhiber localement une région corticale (Barker et al., 1985). Son collègue, Dr. Kupers, a utilisé cette même technique de façon répétitive (rTMS) sur des aveugles au niveau du cortex occipital et somatosensoriel primaire (S1) et les disruptions dans V1 ont fait perdre l'habileté de lire le Braille, alors que celles sur S1 n'ont eu aucun effet (Kupers et al., 2007). De surcroît, une étude d'imagerie en résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) effectuée dans notre laboratoire sur une tâche de navigation tactile a aussi démontré une activation de l'hippocampe droit, du parahippocampe droit, du cortex occipital et du gyrus fusiforme chez des AP, toutes des structures cruciales à la navigation (O'Keefe, 1976). Seulement le noyau caudé et le thalamus furent activés chez les CV (Chebat et al., 2020b; Gagnon et al., 2012; Kupers et al., 2010).

De multiples études se sont aussi intéressées aux seuils psychophysiques tactile chez l'aveugle et la majorité des résultats obtenus suggèrent une meilleure sensibilité tactile à la suite de cette colonisation du système visuel par des influx non-visuels. Par exemple, plusieurs travaux ont montré une acuité tactile augmentée des doigts chez des aveugles lecteurs de Braille dans des tâches de reconnaissance des lettres bossés (Sterr et al., 1998), de discrimination d'orientations d'un réseau en relief (Van Boven et al., 2000) et de textures (Alary et al., 2009) lorsque comparés à des CV. Quoique cette sensibilité tactile augmentée puisse être liée à la perte de vision, celle-ci peut simplement être influencée par le surentraînement des doigts dû à la lecture du Braille chez les aveugles. En 2011, Wong et ses collègues ont démontré que cette augmentation tactile des aveugles est en lien à leur expérience haptique plus importante. En faisant des tests de discrimination d'orientation d'un réseau de relief avec les doigts et, par la suite, avec les lèvres de lecteurs de Braille, ils ont découvert que les aveugles performaient mieux que les CV seulement avec les doigts et qu'il n'y avait aucune différence lorsque les tests furent effectués sur les lèvres (Wong et al., 2011). En revanche, ces changements plastiques peuvent aussi engendrer une perception somatosensorielle erronée. Après avoir reçu de fines stimulations tactiles au bout des doigts, des lecteurs de Braille faisaient plus d'erreurs que les CV lorsqu'ils devaient indiquer sur quel doigt les stimuli avaient été appliqués (Sterr et al., 1998).

2.2 L'audition

Les travaux effectués sur l'audition des individus aveugles résultent en des conclusions psychophysiques mitigées. Bien que plusieurs études concluent à une supra-capacité auditive, certaines montrent une équivalence avec les individus normaux alors qu'une déficience est observée dans d'autres travaux. Étant une modalité qui traite d'une multitude d'aspects sonores tels que le traitement du langage, la fréquence et la spatialisation du son, il semblerait que les différences de capacités auditives entre les aveugles et les individus voyants soient connexes à la complexité et aux caractéristiques de la tâche en jeu (Frasnelli et al., 2011).

2.2.1 Traitement du langage

En 1981, Starlinger et Niemeyer publient une étude ne démontrant aucune différence dans le traitement périphérique des sons (fait par l'oreille externe, moyenne et interne) chez les AP lorsque comparés à des CV (Starlinger & Niemeyer, 1981). Dans la même année, ils publient une étude conjointe qui explore le traitement central auditif (aire auditive primaire A1 et ses aires associatives) à l'aide de tests d'intégration binaurale du son pur et d'intelligibilité vocale monaurale. Ils ont observé des meilleures performances dans la discrimination des discours et des tonalités verbales chez les AP (Niemeyer & Starlinger, 1981). Quant à Muchnik et son équipe, ils ont révélé que les AP avaient une meilleure discrimination des discours seulement en présence de conditions bruyantes. En condition de silence, aucune différence ne fut observée (Muchnik et al., 1991). D'autres se sont intéressés à la reconnaissance vocale et ils ont démontré une équivalence de performance entre les AP, les AT et les CV. Dans la même étude, ils n'ont pas vu d'activation du cortex occipital chez aucun groupe lors de l'analyse vocale (Gougoux et al., 2009). Toutefois, d'autres études en neuroimagerie démontrent une corrélation entre l'implication du cortex visuel dans des tâches langagières telles que le traitement des discours (Röder et al., 2002), le jugement sémantique (Burton et al., 2003; Burton et al., 2002) et la mémoire verbale (Amedi et al., 2003) avec de meilleures performances chez les aveugles.

2.2.2 Traitement des fréquences sonores

Les aveugles ont plus de facilité à discriminer les fréquences sonores que les voyants. En 2004, des chercheurs ont comparé des AP, des AT et des CV dans un test où deux sons leurs étaient présentés. Les participants devaient indiquer si le deuxième son était d'une fréquence plus basse ou plus haute que le précédent et autant les AP que les AT ont mieux performé que les CV. D'ailleurs, ils ont observé que plus la cécité apparaissait en bas âge, plus les performances étaient meilleures (Gougoux et al., 2004). Ces résultats sont similaires à ce que d'autres chercheurs ont trouvés puisqu'ils démontrent une discrimination des fréquences absolues améliorée chez des AP musiciens comparativement à des musiciens voyants (Hamilton et al., 2004). La discrimination des fréquences absolues réfère à la capacité d'identifier plusieurs fréquences de l'échelle musicale de l'Ouest sans aucune référence de tonalité externe (Miyazaki,

1988). De plus, une étude d'IRMf a corrélé cette supra-capacité avec des activations supplémentaires dans les aires extrastriées du cortex occipital et dans le cortex pariétal gauche chez une AP musicienne (Ross et al., 2003). Bien que cette étude ait été effectuée avec seulement un sujet, elle fut la première à dévoiler que le recrutement du système visuel par le système auditif a une implication dans l'intégration des fréquences sonores chez les aveugles. Par la suite, d'importants travaux faits avec une technique d'IRM permettant de mesurer l'épaisseur corticale ont établi une corrélation entre une épaisseur de V1 plus grande chez des AP et des meilleures performances dans la discrimination des fréquences (Voss & Zatorre, 2012).

2.2.3 Traitement spatial des sons

La vision a une grande importance dans l'intégration des informations spatiales de l'environnement. La cécité fait en sorte que l'audition devient la modalité prédominante dans les traitements spatiaux et dans les déplacements des individus en déficience visuelle. C'est pourquoi les chercheurs se sont grandement intéressés aux traitements spatiaux des sons chez les aveugles. En 1998, une étude pionnière a démontré que la vision n'est pas essentielle à la calibration des cartes spatiales auditives. En se penchant la capacité des AP à localiser des sons sur l'axe horizontal de manière binaurale et monaurale (avec une oreille occlue), leurs résultats ont indiqué qu'en conditions binaurales, les AP ont une capacité de localisation équivalente aux CV alors qu'en conditions monaurales, ils étaient meilleurs que les CV (Lessard et al., 1998). Ensuite, plusieurs travaux ont bonifié ces résultats en démontrant que même dans des conditions binaurales, les aveugles ont des supra-capacités lorsque les sons sont localisés en périphérie. Ils ont aussi confirmé les résultats de l'étude de Lessard et ses collègues en montrant une équivalence avec les CV lorsque les sons étaient centrés (Röder et al., 1999; Simon et al., 2002). Cependant, dans toutes ces expériences, les sources sonores étaient dans l'espace égocentrique (aussi nommé espace péripersonnel), des participants, c'est-à-dire qu'elles étaient à proximité des participants. Cet espace est très utilisé par les aveugles puisqu'ils peuvent calibrer leurs représentations auditives de cette région selon des rétroactions sensorimotrices; toucher la cible sonore constitue un bon exemple (Ihsen et al., 2010). Néanmoins, il semblerait que la vision ne soit pas nécessaire pour calibrer l'espace auditif lointain (région où la calibration sensorimotrice

est impossible). Étonnement, les aveugles (AP et AT) ont autant de facilité que les voyants à localiser les sons dans cet espace lointain ce qui démontre bel et bien qu'ils ont l'habileté de se créer des cartes mentales auditives efficacement. Dans cette même étude, les deux groupes d'aveugles performaient mieux que leurs homologues voyants lorsqu'ils devaient analyser des indices spectraux pour localiser les sources sonores (Fieger et al., 2006; Voss et al., 2004). Les indices spectraux (voir figure 1, page 34) réfèrent à la différence de temps de captation du son dans chaque oreille, les différences d'intensité de celui-ci ainsi qu'aux informations nécessaires pour déterminer l'angle de la provenance du son (Blauert, 1997). Ces apprentissages suggèrent donc que la supra-capacité des aveugles en périphérie est causée par un meilleur traitement des informations auditives subtiles puisque ces indices spectraux prennent leur importance plus ils sont en périphérie (au centre la différence de temps inter-auriculaire est nulle et l'intensité du son est similaire dans les deux oreilles) (Woodworth & Schlosberg, 1938). D'ailleurs, cette augmentation sensorielle serait causée par l'implication du lobe occipital dans le traitement de ces informations spatiales auditives. En effet, plusieurs études ont révélé que les aveugles possédant de meilleures capacités de localisation de sons recruterait le système visuel (principalement la voie dorsale dont le cunéus droit et le gyrus médian occipital droit) dans ces tâches (Collignon et al., 2007; Collignon et al., 2011; Gougoux et al., 2005; Voss et al., 2008). De plus, cela peut expliquer les résultats de Lessard et ses collègues, car en conditions monaurales ces informations deviennent essentielles (Lessard et al., 1998). Toutefois, certains ont révélé que l'absence de vision diminue l'aptitude à repérer les sons sur l'axe verticale ce qui insinue que la vision joue un rôle important dans la calibration verticale de l'environnement spatial auditif (Lewald, 2002).

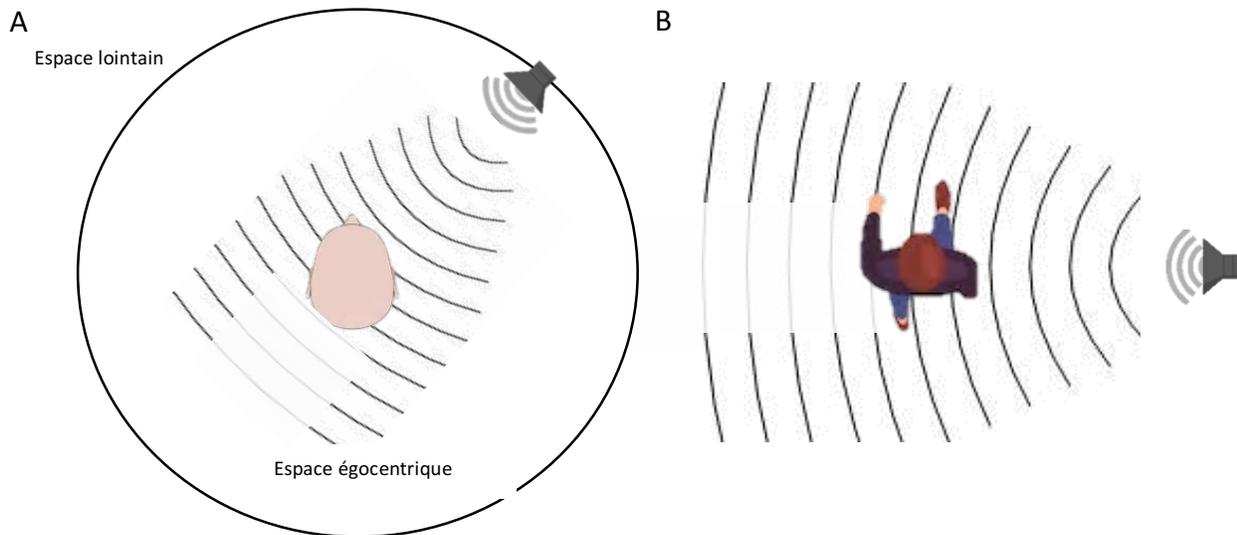


Figure 1. Cette figure illustre comment la position du sujet influence les indices spectraux du son. (A) Le son atteint l'oreille droite avant l'oreille gauche (différence temporelle inter-auriculaire). L'espace égocentrique (calibré par les rétroactions sensorimotrices) et l'espace lointain sont aussi représentés. (B) La tête du sujet cause de l'interférence, résultant en une différence de fréquences et d'intensité dans le son entre l'oreille droite et l'oreille gauche.

2.3 Sens chimiques et traitement de la douleur

2.3.1 Olfaction

Les sens chimiques sont sans aucun doute les modalités les moins utilisés par les individus en cécité. Malgré tout, les études suggèrent que les AP surclassent les voyants dans des tâches d'identifications des odeurs (Murphy & Cain, 1986) et qu'ils ont un seuil de détection orthonasale des odeurs plus bas (Beaulieu-Lefebvre et al., 2011; Gagnon, Ismaili, et al., 2015). Aussi, une étude en IRM morphométrique a corrélé une hypertrophie du bulbe olfactif chez des AP avec cette sensibilité olfactive augmentée (Rombaux et al., 2010) alors qu'une étude IRMf de notre laboratoire a montré une implication du système visuel dans la détection des odeurs et une activation accrue des aires olfactives de hauts niveaux (cortex orbito-frontal latéral, thalamus dorsal médian et l'hippocampe) (Kupers et al., 2011).

2.3.2 Gustation

Quant au goûter, très peu d'études s'y sont intéressées. Deux études de notre laboratoire ont observé une diminution de sensibilité gustative chez les AP (Gagnon et al., 2013; Gagnon, Kupers, et al., 2015).

2.3.3 Traitement de la douleur

Il y a consensus à savoir que la vision a un effet inhibiteur sur la perception de la douleur (Longo et al., 2009; Zubek et al., 1964). Il serait donc logique que l'absence de vision accentue la sensibilité à la douleur. Plusieurs études de notre laboratoire ont révélé qu'en effet, les AP ont un seuil de sensibilité thermique plus bas que les voyants (Slimani et al., 2013), alors qu'aucune différence ne fut remarquée pour les AT (Slimani et al., 2014). Cette hypersensibilité est causée en raison d'un traitement des stimuli accéléré par les fibres C (Slimani et al., 2016).

2.4 Psychophysique des sens résiduels

Il est maintenant évident que l'expérience sans vision et la plasticité intermodale du cerveau aveugle créent un gap dans les seuils psychophysiques des sens résiduels lorsqu'ils sont comparés à des voyants. Les recherches suggèrent des supra-capacités au niveau du tactile, de la majorité des aspects de l'ouïe, de l'olfaction ainsi que de la sensibilité à la douleur. Ces différences sont donc résumées dans le tableau 1 présenté ci-dessous.

Tableau 1. Différences des seuils psychophysiques des aveugles en comparaison avec des voyants (* : meilleure performance ** = : performance équivalente *** - : moins bonne performance).

Sens à l'étude	Article	Groupe(s) étudié(s)	Test	Performance versus des voyants (CV)
Tactile	(Sterr et al., 1998)	Lecteurs de Braille (6 AP & 4 AT)	Reconnaissance de lettres bossées	+

	(Van Boven et al., 2000)	AP (15)	Discrimination de réseaux d'orientations en relief	+
	(Alary et al., 2009)	AP (16)	Discrimination de textures	+
Audition	(Starlinger & Niemeyer, 1981)	AP (13) & AT (5)	Seuil différentiel d'intensité (traitement périphérique)	=**
			Seuil différentiel des fréquences (traitement périphérique)	=
			Différence de temps inter-auriculaire directionnelle (traitement périphérique)	=
	(Niemeyer & Starlinger, 1981)		Discrimination de la parole	+
			Discrimination de tonalités pures	+
	(Muchnik et al., 1991)	AP (8) & AT (8)	Discrimination des discours en conditions bruyantes	+
			Discrimination des discours en conditions silencieuses	=
	(Gougoux et al., 2009)	AP (5) & AT (10)	Reconnaissance vocale	=
	(Amedi et al., 2003)	AP (10)	Mémoire verbale	+
	(Gougoux et al., 2004)	AP (7) & AT (7)	Discrimination des fréquences	+
(Lessard et al., 1998)	AP (8)	Localisation des sons sur l'axe horizontale (binaurale)	=	

			Localisation des sons sur l'axe horizontale (monaurale)	+
	(Röder et al., 1999)	AP	Localisation des sons en périphérie sur l'axe horizontale égocentrique	+
	(Voss et al., 2004)	AP (14) & AT (9)	Localisation des sons sur l'axe horizontale en espace lointaine	Centrale : = Périphérique : +
	(Lewald, 2002)	AP (6)	Localisation des sons sur l'axe verticale	- ***
Olfaction	(Murphy & Cain, 1986)	AP (7) & AT (13)	Identification des odeurs	+
	(Gagnon, Ismaili, et al., 2015)	AP (14)	Seuil de sensibilité de détection des odeurs	Plus bas
Gustation	(Gagnon et al., 2013)		Seuil de sensibilité de détections des saveurs	Plus haut
Traitement de la douleur	(Slimani et al., 2014)	AP (23) & AT (12)	Seuil de sensibilité à la douleur thermique	AP : Plus bas AT : équivalent

3 - Navigation spatiale

La navigation réfère à la capacité de se déplacer dans l'espace, de s'orienter, de détecter et d'éviter des obstacles (Long & Hill, 1997). Étant une tâche complexe, il faut concevoir la navigation comme un ensemble de différents processus cognitifs et non comme un processus cognitif en tant que tel. En effet, dans l'optique d'acquérir et traiter le plus d'informations spatiales possible, cette fonction de haut niveau regroupe plusieurs systèmes tels que la vision, le système vestibulaire, la proprioception, le système somatosensoriel, le cervelet ainsi que

l'audition (Chebat et al., 2020a; Rondi-Reig et al., 2014; Tosoni et al., 2008). En combinant leurs savoirs, ces processus multisensoriels permettent à l'individu de se créer une carte cognitive (aussi nommée carte mentale) afin de relier sa position aux obstacles de ses alentours pour lui permettre de mieux s'orienter et se déplacer. Ces cartes imaginaires, ou représentations spatiales, ont été définies comme étant « une réflexion mentale symbolique et interne de l'action spatiale » (Shemyakin, 1962). De façon générale, la navigation se sépare en trois phases distinctes qui ne suivent pas nécessairement un ordre chronologique (Passini, 1981) :

- L'intégration des informations de l'environnement présent et des expériences passées permettant la création d'une carte cognitive.
- La prise de décision et la planification d'une mission spécifique faisant suite aux traitements des informations de l'environnement (création de la carte cognitive).
- Transformation de la planification en comportements et exécution du plan.

Bien que ces principes soient cruciaux pour la fabrication d'une représentation mentale de l'espace, des variations interindividuelles font en sorte que les individus vont utiliser ces informations spatiales différemment (Blajenkova et al., 2005; Wolbers & Hegarty, 2010). En réalité, deux principaux systèmes de référence pour la navigation existent chez l'humain : le système égocentrique et celui allocentrique (Klatzky, 1998). Le premier place le sujet au centre de sa carte cognitive, tel un point de référence, et positionne les objets de l'environnement en relation avec celui-ci. Dans cette perspective, l'individu n'utilise donc aucun point de repère externe, mais seulement la position de son corps. Par exemple, pour naviguer, il se dira : tourne à droite, dans quelques pas tourne à gauche, etc. Quant à la représentation allocentrique, l'individu se conceptualise l'espace selon des axes fixes, tel un plan cartésien. Cette perception de l'environnement focus donc sur les différences de positions, d'angles et de distances entre les objets. Par exemple, pour atteindre son objectif avec ce type de stratégie, le sujet se donnera comme directives : avance 3 kilomètres vers le Nord et après 5 kilomètres vers l'Est. C'est l'individu qui se déplace dans l'environnement et non l'environnement qui se déplace autour de ce dernier (égocentrique) (Norman et al., 2005).

3.1 Cognition spatiale et développement

Jean Piaget, un psychologue de renom, a étudié le développement de la conception mentale de l'espace. En observant ses propres enfants, il émet comme hypothèse que l'apprentissage spatial évolue selon quatre stades de développement précis. Ces stades développementaux seraient séquentiels de sorte que chaque nouvelle étape dépendrait de la précédente, telle une hiérarchie fixe. Sa théorie pionnière, quoique contestée, stipule que le nourrisson débute sa perception spatiale par une représentation purement égocentrique de son monde pour ensuite transiter vers des perspectives plus allocentriques (Lovell, 1959). Commenant avec des comportements réflexes, l'expérience et les jeux lui font comprendre comment discerner son soi des autres objets de l'environnement ; il s'agit du stade 1. Dès lors, il commence à prendre conscience qu'il peut utiliser les informations de ses alentours comme repères. Cependant, sa représentation spatiale reste fixe, non coordonnée et aucune manipulation de l'espace n'est possible (stade 2). Rendu au stade 3, le gamin a développé l'habileté de manipuler sa carte cognitive de manière logique et structurée. À ce stade, il peut d'ailleurs utiliser le langage pour transformer sa représentation mentale. Ayant obtenu plus d'expérience, l'enfant devenu adolescent, est maintenant apte à se créer un environnement mental sans aucune perception, c'est-à-dire de façon purement imaginaire (stade 4) (Piaget, 2003).

En 1990, une scientifique (Acredolo, 1990) s'est intéressée à cette représentation immobile (stade 1 et 2) et testa plusieurs enfants dans un paradigme où les sujets devaient prédire le lieu d'apparition d'une récompense suite à un son. Groupés selon leur âge (6, 9, 11 et 18 mois), ils étaient positionnés dans une pièce carrée où deux fenêtres étaient l'une en face de l'autre (mur gauche et mur droit). Les enfants faisaient face à une table ronde placée au centre de la pièce sur laquelle une sonnette y était installée. Lorsque celle-ci sonnait, un adulte apparaissait dans l'une des fenêtres (toujours la même) pour divertir le sujet (récompense). Les participants étaient entraînés à associer le bruit de la sonnette à l'adulte. Une fois l'association faite, ils étaient déplacés dans la pièce, c'est-à-dire qu'on changeait leur point de vue de l'espace afin d'évaluer leur capacité à utiliser les repères pour se réorienter. Dans la première condition, aucun point de référence n'était présent alors que dans la deuxième, des étoiles sur la sonnette

et sur la fenêtre qui présentait la récompense permettaient aux sujets de se repérer (voir figure 2, page 40). Sans aucun repère, tous les groupes utilisaient une stratégie strictement égocentrique, ce qui empêchait de garder une trace de la récompense. En d'autres termes, si la récompense était à droite lors de l'entraînement, les enfants prédisaient cette direction même après avoir changé de position. Dans la condition avec les étoiles, seulement les groupes plus âgés, soit ceux de 11 et 18 mois, ont été en mesure d'utiliser les repères pour prédire le lieu de la récompense. De façon intéressante, les bébés âgés de 9 mois avaient tendance à regarder les deux fenêtres, comme s'ils ne savaient pas à quels indices faire confiance : ceux égocentriques ou les points de repère (allocentrique). Ces résultats concordent avec la théorie de Piaget qui stipule que l'expérience favorise une transition de stratégies purement égocentriques vers des stratégies allocentriques. Cependant, cette évolution n'est pas absolue. En effet, avoir une perspective centrée sur soi-même reste toujours utile. Par exemple, dans un environnement où les informations sont minimales et où il est impossible de se créer des repères, celle-ci devient essentielle. Elle permet à l'individu d'utiliser ses propres mouvements, son système vestibulaire et sa proprioception pour se créer une route mentale qui va lui permettre de se remémorer le chemin qu'il a fait. Cette stratégie est connue sous le nom « d'intégration du chemin ou path integration » (McNaughton et al., 2006). Beaucoup d'études ont montré que les navigateurs expérimentés sont meilleurs pour naviguer (Hegarty et al., 2006) dû à leur capacité d'utiliser plusieurs stratégies de navigation, mais surtout grâce à leur facilité à les interchanger en fonction de la situation (Kato & Takeuchi, 2003; Saucier et al., 2003).

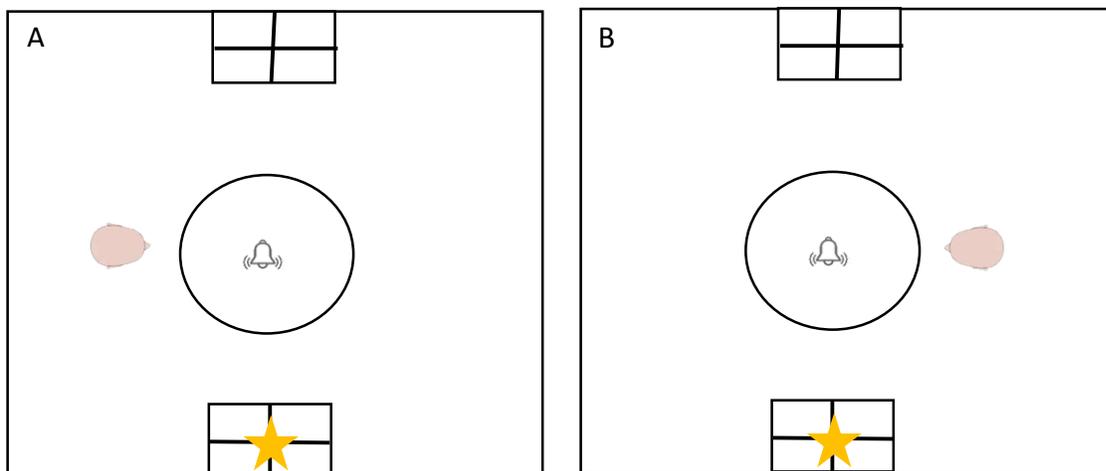


Figure 2. Représentation de la pièce où l'expérience d'Acredolo à lieu. La figure illustre le point de vue du participant lors de l'entraînement (A) et lors de la tâche (B). Le point de repère utilisé dans la condition 2 de l'expérience est indiqué par l'étoile jaune.

3.2 Base neuronales de la navigation

La navigation demande beaucoup d'intégration de stimuli, de traitements multisensoriels, de prises de décisions et ultimement, d'adaptations. Étant une fonction cognitive élevée, il est impossible qu'une seule structure cérébrale soit capable de prendre en charge tous les aspects de cette mission. En effet, un vaste réseau de structures neuronales permet l'accomplissement de cette opération. Des structures telles que l'hippocampe (hip), le complexe parahippocampique (p-hip), qui contient le cortex entorhinal et périrhinal, le cortex pariétal, certains noyaux sous-corticaux et le cortex préfrontal sont activement impliqués dans cette opération. De plus, l'hip et le p-hip abritent des populations cellulaires tels que les « place cells », « grid cells » et « head-direction cells » qui servent à des buts précis (Moser et al., 2008). Ils seront donc décrits en détail dans les prochaines parties.

3.2.1 L'hippocampe, les place cells et les head-direction cells

En 1971, O'Keefe et Dostrovsky ont publié un des plus importants articles sur la cognition spatiale (O'Keefe, 1976). En effectuant des enregistrements extracellulaires chez le rat lorsqu'il cherchait de la nourriture dans une boîte, ils ont découvert une population de neurones dans la couche des cellules pyramidales de l'hip (majoritairement dans l'hip postérieur) qui s'activait face à différents endroits de la boîte. Le phénomène de PLT (décrit dans la section 1) permettrait à chaque neurone de développer une préférence pour un lieu précis de façon si spécifique que simplement en observant la séquence d'activation de ces cellules, il était possible de retracer la route empruntée par le rat. C'est pourquoi ils ont nommé cette population neuronale : « place cells ». Ensuite, plusieurs études ont démontré que ces cellules étaient contrôlées par des informations multisensorielles. Par exemple, des changements dans les points de repère ou dans des odeurs associées aux lieux font changer l'endroit d'activation de ces neurones. Si une rotation

des points de repère était effectuée, les place cells pivotaient avec eux (Muller & Kubie, 1987; O'Keefe & Speakman, 1987). De plus, ces cellules conservent leur activité dans la noirceur, indiquant clairement que la vision n'est pas essentielle dans ce mécanisme de détermination de l'endroit stimulant la cellule (Quirk et al., 1990). Peut-être que l'aspect le plus fascinant de ces cellules est l'habileté qu'elles ont à modifier la cartographie (remapping) de leur environnement. Par exemple, si une cellule s'active dans un endroit X, elle va s'activer dans un nouveau lieu Y si elle se trouve dans un environnement différent (Skaggs & McNaughton, 1998). En revanche, ces cellules ne sont pas organisées de façon relationnelle, c'est-à-dire que deux cellules voisines ne vont pas s'activer pour deux endroits voisins. C'est donc une combinaison unique d'activations des place cells qui fournit l'information sur la position actuelle dans l'environnement (Redish et al., 2001; Samsonovich & McNaughton, 1997). Étant donné la différence entre le rat et l'humain, il se pourrait que ces place cells soient absentes ou différentes chez l'humain. Cependant, plusieurs études ont démontré que l'hippocampe humain code pour des endroits spatiaux spécifiques (Duarte et al., 2014; Guterstam et al., 2015; Hassabis et al., 2009; Kyle et al., 2015) et qu'une hypertrophie de sa partie postérieure corrèle avec de meilleures performances de navigation (Maguire et al., 2000). Outre cela, il a été observé que des lésions à l'hippocampe perturbent les capacités de navigation chez l'humain (Maguire et al., 2006; Pearce et al., 1998).

Une région spécifique de l'hippocampe nommée le présubiculum contient aussi des cellules spécialisées dans l'orientation de la tête (head-direction cells). Des travaux fait chez le rat ont démontré que ces cellules s'activent plus fortement lorsque le rat fait face à une direction spécifique, tout comme les place cells le font pour un lieu (Ranck Jr, 1984; Taube et al., 1990a, 1990b). Encore, ces cellules conservent leurs patrons d'activation en l'absence d'information visuelle, comme les place cells (Wills et al., 2010). De surcroît, ces cellules sont aussi situées dans d'autres régions (thalamus antérieur, noyau mamillaire latéral et le tegmentum dorsal) du cerveau du rat (Taube, 2007). Bien qu'aucune étude n'ait montré la présence des head-direction cells chez l'humain, une étude IRMf en 2016 a révélé une forte activation du cortex rétrosplénial et de l'hippocampe lorsque les individus faisaient face à un point de vue. Cette activation changeait en fonction du point de vue comme les head-direction cells chez le rat (Shine et al., 2016).

3.2.2 Complexe parahippocampique et les grid cells

Comme son nom le suggère, le complexe parahippocampique est adjacent à l'hippocampe. Composé principalement du cortex entorhinal et du cortex périrhinal, il projette massivement à l'hip (Aguirre et al., 1996). Contrairement aux place cells de l'hip, certains de ses neurones s'activent selon des régions qui sont espacées uniformément. Ces régions forment alors un grillage géométrique qui couvre quasi-entièrement l'environnement dans lequel le sujet se trouve (Hafting et al., 2005). Ces neurones ont des champs récepteurs qui caractérisent les distances entre différents points, les orientations selon un axe de référence externe ainsi que le déplacement des axes horizontales et verticales de l'espace (Barry et al., 2006; Sargolini et al., 2006). Ces cellules fournissent donc une base potentielle pour coder les propriétés métriques d'un espace. Des études ont révélé l'existence de mécanismes similaires dans le cortex entorhinal des humains (Doeller et al., 2010). De plus, l'activité de cette population neuronale est plus grande lorsque le sujet est dans un nouvel environnement (Epstein et al., 1999), ce qui insinue que cette région du p-hip joue un rôle important dans la consolidation et la reconnaissance visuelle des lieux (Epstein & Kanwisher, 1998). Des études de cas ont appuyé cette hypothèse en révélant qu'une lésion dans ce secteur chez des humains voyants abolit leur capacité à apprendre une nouvelle route (Hublet & Demeurisse, 1992; Maguire, 2001).

Il est possible de retrouver des cellules à caractéristiques similaires dans le cortex rétrosplénial (situé dans le sulcus pariéto-occipital) (Epstein, 2008). Le p-hip semble jouer son rôle dans l'imagination égocentrique de l'espace, c'est-à-dire qu'il permet la reconstruction du lieu sans le positionner dans l'environnement. Les cellules du rétrosplénial seraient complémentaires aux grid cells en situant cette représentation faite par le p-hip dans l'environnement (Epstein et al., 2007). Dr. Daniel-Robert Chebat, un collègue de mon superviseur Dr. Ptito, hypothétise dans un de ses articles récents que cette interdépendance entre les deux structures faciliterait la transition d'une représentation égocentrique vers une représentation allocentrique (Chebat et al., 2020a; Epstein, 2008).

3.2.3 Intégration, planification et exécution de la navigation

Rappelons-nous les trois phases distinctes de la navigation selon Passini (Passini, 1981) :

- *L'intégration des informations de l'environnement présent et des expériences passées permettant la création d'une carte cognitive.*

Cette étape est principalement prise en charge par les systèmes sensoriels, l'hip et le p-hip. L'intégration des informations sensorielles permettent la calibration des place cells de l'hip qui reconnaissent des endroits spécifiques utilisés comme points de repère (indices allocentriques). Les place cells communiquent avec les head-direction cells qui, en répondant à des directions spécifiques de la tête, agissent comme compas interne (indices égocentriques). Bien que la nature de l'interaction entre les grid cells et les place cells demeure floue, les grid cells du p-hip permettent de créer une représentation métrique de l'espace tout en caractérisant les distances séparant chaque lieu, les orientations et les déplacements des axes horizontales et verticales dans l'espace. Cependant, cette représentation utilise un point de référence égocentrique. Il s'agit donc des cellules similaires du cortex rétrosplénial qui positionnent la représentation de l'espace des grid cells telle qu'elle est dans l'environnement (indices allocentriques).

- *La prise de décision et la planification d'une mission spécifique à la suite des traitements des informations de l'environnement (création de la carte cognitive).*

La communication entre tous ces systèmes permet à l'individu de s'imaginer une carte cognitive de l'espace : les place cells reconnaissent les repères, les grid cells établissent les relations de distance, d'orientation et de déplacements entre les repères alors que les head-direction cells servent de compas.

Maintenant que la carte mentale de ses alentours est créée, il peut enfin planifier ses mouvements et choisir quelle route il doit prendre. Il semblerait que le cortex pariétal ait un rôle important dans cette planification. En 2009, Douglas Nitz émet comme hypothèse que le cortex pariétal interagirait avec l'hippocampe pour choisir quelle route

est la plus appropriée (Nitz, 2009). Plusieurs études effectuées chez le rat et le singe appuient cette dernière. Par exemple, l'activité des neurones pariétaux du rat est corrélée à la locomotion, à la direction des mouvements, à la position spatiale ainsi qu'aux étapes de navigation dans un chemin (McNaughton et al., 1996; Nitz, 2009; Nitz, 2006). Des corrélations avec l'activité des neurones pariétaux, la locomotion et la direction des mouvements furent aussi constatées chez le singe (Crowe et al., 2004a, 2004b). Des études de lésions du cortex pariétal ont indiqué un déficit dans l'intégration d'une route autant chez le rat que chez le singe (King & Corwin, 1993; Save et al., 2001; Weniger et al., 2009). Des études IRMf ont montré que le cortex pariétal humain est actif à plusieurs moments dans une tâche de navigation (Spiers & Maguire, 2006). Chez les humains lésés, une désorientation spatiale est observée (Hublet & Demeurisse, 1992). Faisant partie de la voie dorsale du système visuel, le cortex pariétal est aussi impliqué dans la perception du mouvement (Mishkin et al., 1983).

- *Transformation de la planification en comportements et exécution du plan.*

Il est maintenant temps de transformer cette planification en actions. Les noyaux sous-corticaux comme le noyau accumbens et le noyau caudé ont la responsabilité d'organiser tous les aspects moteurs du comportement telles que la locomotion et la vitesse du mouvement (Burgess et al., 2002). Le cervelet raffine et adapte les mouvements entrepris (Rondi-Reig et al., 2014). De plus, le cortex préfrontal, l'hypothalamus, le thalamus et l'amygdale s'occupent de la motivation liée au comportement (Lenck-Santini et al., 2004).

3.3 Cécité et navigation spatiale

La vision est assurément très importante pour la navigation d'une personne voyante (McFadyen et al., 2007). Quant à l'individu aux prises avec une déficience visuelle, il apprend à utiliser ses sens intacts pour pallier son déficit sensoriel. D'ailleurs, les stades de développement proposés par Piaget s'appliquent aussi à l'aveugle de naissance. Quoique les enfants aveugles ont un retard de quelques mois dans leur développement, des études ont révélé qu'ils prolongent

leur période de développement sensorimotrice (Adelson & Fraiberg, 1974; Norris, 1957). Cette période est fondamentale dans leur calibration sensorielle tactile et auditive (Ihsen et al., 2010). Le tactile et l'audition sont deux modalités qui peuvent intégrer des informations spatiales. En effet, la résolution d'un labyrinthe tactile active des régions cruciales à la navigation (Gagnon et al., 2012) (voir section 2.1). Ce faisant, les aveugles sont capables de localiser des sons de façon équivalente aux voyants et ils réussissent à les surclasser dans certaines conditions (Fieger et al., 2006; Röder et al., 1999; Voss et al., 2004) (voir section 2.2.3). De plus, avec de l'entraînement, ils sont en mesure d'utiliser l'écholocation pour percevoir et éviter des obstacles (Ammons et al., 1953; Kellogg, 1962; Strelow & Brabyn, 1982; Supa et al., 1944). Il est donc évident que les aveugles ont l'habileté de faire une représentation mentale de leur environnement pour ensuite l'utiliser à des fins de navigation. Il n'y a aucune raison de croire que la cécité cause un déficit cognitif au niveau de la compréhension de l'espace.

Malgré tout, les aveugles sont-ils moins bons que les voyants en navigation ? Une étude de notre laboratoire effectuée auprès des AP a permis de découvrir une importante diminution volumétrique de leur hip postérieure droite, une structure cruciale à la navigation spatiale (Chebat, Chen, et al., 2007). D'autre part, nombreuses études mettent en lumière que les AP performant mieux que des voyants aux yeux bandés et que des AT dans des tâches de navigation spatiale. Néanmoins, leurs performances sont moindres lorsque comparées à celles de voyants qui ont effectué l'exercice les yeux ouverts (Fortin et al., 2008; Kellogg, 1962; Passini et al., 1990; Rieser et al., 1992; Strelow & Brabyn, 1982). Ceci peut être expliqué par le fait que les aveugles ont accès à moins d'informations que les voyants. Bien que l'audition et le tactile soient capables d'intégrer des informations spatiales, ils les perçoivent de manières séquentielles (Bregman & Pinker, 1978; Ruggiero et al., 2012). De plus, ces modalités sont limitées par l'environnement même puisque ce n'est pas tous les points de références qui sont sonores ou qui sont à proximité du toucher. La vision quant à elle, perçoit simultanément les repères loin dans l'environnement (Cattaneo & Vecchi, 2008) et réussit à analyser des espaces larges plus rapidement que le tactile et l'audition en raison de la rapidité des mouvements oculaires (Duchowski, 2007). C'est pourquoi les aveugles favorisent des stratégies égocentriques à celles allocentriques (Iachini et al., 2014).

Cependant, ils utilisent les repères qu'ils détectent en touchant ou en entendant afin de se guider et améliorer leur carte cognitive (Schinazi et al., 2016).

Par conséquent, l'expérience visuelle des AT nuit à leurs compétences spatio-cognitives. En effet, celle-ci a stimulé le développement de stratégies à perspectives allocentriques (Pasqualotto et al., 2013). Ces dernières sont normalement privilégiées à des perspectives égocentriques dans des tâches de navigation (Hegarty et al., 2006). Puisque la cécité diminue leur capacité à se représenter l'environnement de manière allocentrique, ils doivent réapprendre à utiliser des stratégies égocentriques avec une quantité limitée d'informations spatiales fournies par leurs modalités fonctionnelles. La substitution sensorielle permet d'étudier de manière plus approfondie les aspects cognitifs des aveugles. Ce domaine sera donc revu en détail dans la prochaine section.

4 – Substitution sensorielle

4.1 L'héritage de Paul Bach-y-Rita

À la fin des années 1960, un neuroscientifique américain nommé Paul Bach-y-Rita émet comme hypothèse que les yeux ne sont pas essentiels à la vision. Ils seraient les entrées des informations visuelles, mais le cerveau serait celui qui « voit » réellement (Bach-y-Rita, 1972; Bach-y-Rita et al., 1969). Afin de confirmer son hypothèse, il développe le premier appareil de substitution sensorielle (SSD pour le nom anglais : Sensory Substitution Device) : le Touch to Vision Sensory Substitution Device (TV-SSD). La substitution sensorielle permet d'apporter les informations sensorielles manquantes via l'utilisation d'un autre sens intact. Ceci est possible en raison de la plasticité intermodale qui permet à plusieurs modalités de communiquer entre-elles afin d'accomplir une tâche (Harrar et al., 2018). Le TV-SSD fut développé dans l'optique d'acheminer des informations visuelles au cerveau par l'exploitation du tactile. Son système était composé d'une chaise ayant une plaque de 20 par 20 électrodes (400 au total) sur son dossier ainsi que d'une caméra contrôlable à la main (voir figure 3, page 48). Le champ de vision de la

caméra était analysé par un processeur et les images captées étaient dessinées par les électrodes en stimulations tactiles (Bach-y-Rita, 1983; Kaczmarek et al., 1985).

Après avoir été entraînés avec l'appareil, six AP ont réussi à discriminer des formes et à différencier des visages. Ils avaient aussi la compétence de décrire les caractéristiques des individus comme leur posture, leur grandeur et les mouvements qu'ils faisaient (Bach-y-Rita et al., 1969). C'est l'une des premières études à avoir démontré qu'il soit possible d'intégrer des informations visuelles via le tactile.

Jusqu'aux années 1990, il fut l'un des seuls à travailler sur la substitution sensorielle.

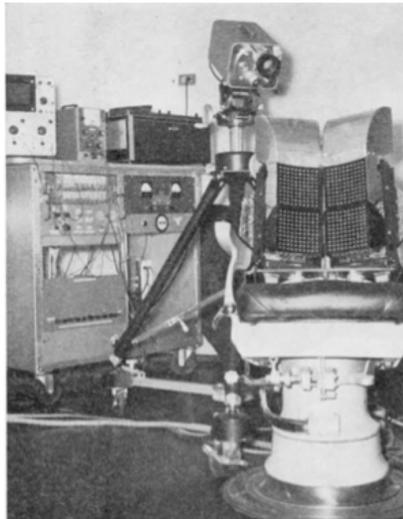


Figure 3. Photo du système TV-SSD développé par Paul Bach-y-Rita. On aperçoit la chaise avec son dossier constitué de 400 électrodes (20 X 20), la caméra contrôlable montée sur un trépieds et le processeur qui traite l'image de la caméra. Tirée de : Bach-y-Rita et al., 1969.

Depuis, de nombreux chercheurs ont développé des nouveaux SSDs tactiles et auditifs (Abboud et al., 2014; Chebat et al., 2018; Johnson & Higgins, 2006; Liu et al., 2018). Tous appliquent le même fonctionnement que le SSD de Bach-y-Rita : une caméra ou un capteur capture les informations de l'environnement et un algorithme traite ces informations. Ensuite, elles sont transmises à l'utilisateur avec des stimulations tactiles ou auditives et il apprend à interpréter ces nouvelles informations pour effectuer une tâche. C'est le cercle moteur de la substitution sensorielle (voir figure 4, page 49).

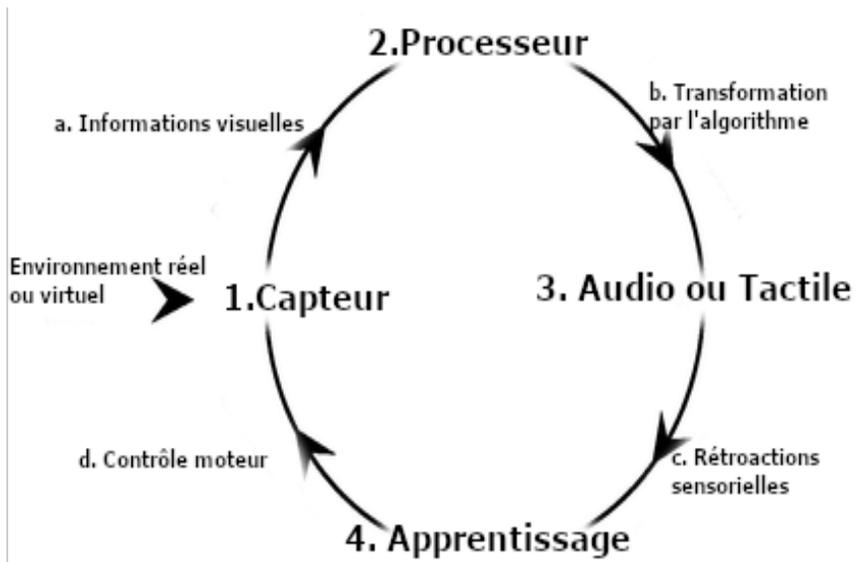


Figure 4. Cette figure illustre les différentes phases du cercle moteur de la substitution sensorielle. (1) Les informations visuelles sont captées par un capteur. (2) Les informations sont traitées par un processeur. (3) Elles sont transformées en stimuli audio ou tactiles. (4) L'utilisateur apprend à intégrer ces nouvelles informations. Adapté de : Chebat et al., 2018

Maintenant, deux SSDs sont principalement étudiés : le TV-SSD et le Vision to Auditory Sensory Substitution Device (VA-SSD) qui est un appareil auditif (Chebat et al., 2018). Ces deux systèmes seront discutés dans les prochaines sections.

4.2 Appareils de substitution sensorielle

4.2.1 Tongue Display Unit (TDU)

Plusieurs modèles du TV-SSD furent fabriqués dans le but de le rendre portatif et d'augmenter l'efficacité des utilisateurs avec celui-ci. Bach-y-Rita a essayé de mettre les électrodes sur les doigts (Kaczmarek et al., 1994), sur l'abdomen (Kaczmarek & Bach-Y-Rita, 1995) et sur la langue (Bach-y-Rita et al., 1998; Sampaio et al., 2001). Il en conclut que la langue était la meilleure option en raison de ses nombreux récepteurs cutanés et de son environnement aqueux qui facilite la transmission des stimuli électro-tactiles (Bach-y-Rita, 2004). D'autres ont repris son modèle et l'ont nommé le Tongue Display Unit (TDU) (Ptito et al., 2005). En utilisant le E de l'échelle de Snellen, ils ont évalué l'acuité visuo-tactile que les utilisateurs avaient avec le TDU. Après avoir été entraînés, plus de 30% des AP ont atteint l'acuité maximale de 1/90 offerte par le TDU alors que seulement 8,4% des CV l'ont atteint. De plus, le TDU utilisé dans cette étude était un vieux modèle qui ne contenait que 100 électrodes (Chebat, Rainville, et al., 2007). Les modèles

récents contiennent une matrice de 400 électrodes (chaque électrode est l'équivalent d'un pixel) insinuant alors que l'acuité visuo-tactile risque d'être meilleure avec les nouveaux. Ensuite, ils ont évalué l'habileté des AP et des CV à identifier différentes orientations du T de l'échelle de Snellen tout en mesurant leur activité corticale avec la technique de PET. Après 7 heures d'entraînement, les AP ont montré une augmentation d'activité reliée à tâche dans leur cortex occipital, leur cunéus, leur cortex occipito-pariétal et occipito-temporal (Ptito et al., 2005). Depuis, plusieurs études ont démontré que le TDU permet aux aveugles de percevoir des lumières (Lee et al., 2014; Nau et al., 2013), des mouvements (Matteau et al., 2010; Ptito et al., 2009), de reconnaître des formes (Ptito & Kupers, 2005; Vincent et al., 2014), des objets (Nau et al., 2015; Williams et al., 2011) et des lettres (Chebat, Rainville, et al., 2007; Pamir et al., 2020).

4.2.2 Le vOICe

En 1992, un nouveau SSD a vu le jour, le vOICe. Ce système utilise l'audition pour transmettre les informations visuelles à son utilisateur. Initialement nommé VA-SSD, il fut renommé pour le vOICe avec les O, I et C en majuscule pour symboliser : « Oh, I see ! » en anglais qui se traduit en : « Oh, je vois ! ». Il utilise un algorithme complexe qui transforme les différentes positions verticales en différentes fréquences sonores et les positions horizontales en différentes durées du son. La luminosité de l'environnement est traduite en différentes amplitudes d'oscillations du son. Ensuite, le processeur de l'appareil additionne ces différents aspects pour fournir un signal audio qui représente les alentours de l'utilisateur (voir figure 5, page 51) (Meijer, 1992).

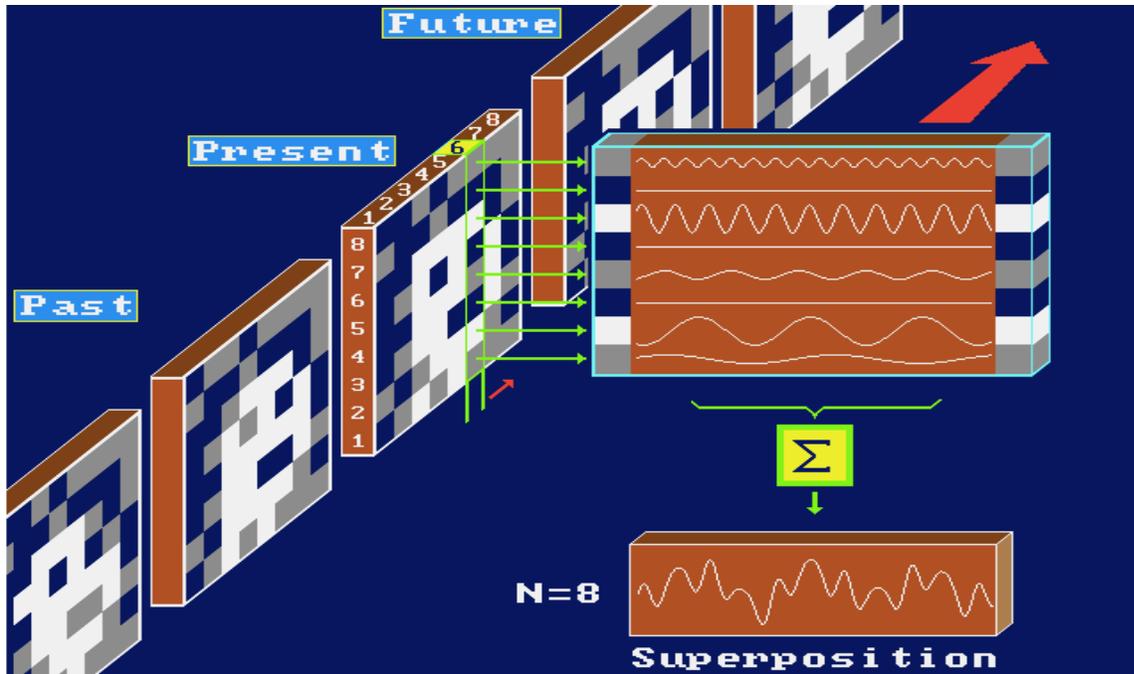


Figure 5. L'image explique le fonctionnement du système vOICE. On aperçoit une image de 8 X 8 pixels qui défile dans le temps (past = passé ; present = présent ; future = futur). Chaque pixel est traité de sorte à ce que les positions verticales modifient les fréquences des sons, les positions horizontales ajustent la durée des sons alors que la luminosité de chaque pixel module l'amplitude des oscillations sonores. Le processeur additionne tous ces facteurs ce qui crée un son précis qui représente l'environnement au complet. Le tout se répète à chaque seconde. Adapté de : Meijer, 1992.

Le système contient 25 344 pixels, ce qui est un net avantage lorsque comparé au 400 pixels offerts par le TDU (Striem-Amit, Guendelman, et al., 2012). Ils ont évalué l'acuité audio-visuel des utilisateurs du système avec le E de l'échelle de Snellen comme dans l'étude sur le TDU. Plus de la moitié des participants (55%) avaient une acuité de 20/320, ce qui dépasse le seuil d'acuité de cécité (20/400) défini par l'Organisation Mondiale de la Santé et surclasse l'acuité obtenu par les utilisateurs du TDU (Chebat, Rainville, et al., 2007; Striem-Amit, Guendelman, et al., 2012). En revanche, les utilisateurs du vOICE avaient en moyenne 73 heures d'entraînement avec l'appareil alors que les utilisateurs du TDU en avaient seulement 7. De plus, plusieurs études ont démontré que les aveugles sont capables de différencier des formes (Amedi et al., 2007), d'identifier des objets (Auvray et al., 2007), de localiser des objets (Proulx et al., 2008), de reconnaître des visages (Arbel-Yaffe & Amedi, 2016) et de lire (Striem-Amit, Cohen, et al., 2012)

avec ce SSD. Ces mêmes études ont révélé une activation du cortex visuel démontrant son implication dans l'intégration du signal audio-visuel produit par l'appareil (Amedi et al., 2007; Arbel-Yaffe & Amedi, 2016; Striem-Amit & Amedi, 2014).

4.3 Attribution distale

Comment est-ce qu'une sensation tactile ou auditive procurée par un SSD peut être perçue comme provenant d'une source externe, loin dans l'espace ? Nécessairement, un couplage entre les stimuli présentés par l'appareil et les objets de l'environnement doit se développer. Auvray et ses collègues argumentent qu'il y a trois composantes distinctes qui sont essentielles pour ce phénomène, dit attribution distale. La première est quand l'individu réalise qu'il y a un objet externe. Les stimulations sont causées par une cause lointaine qui est l'objet. La deuxième est lorsqu'il comprend qu'il y a une association entre les stimulations qu'il reçoit et ses mouvements. La troisième est la compréhension de l'espace perceptuel. L'individu découvre que les variations dans les stimuli sont causées par des variations dans l'espace (Auvray et al., 2005). Pour démontrer leur hypothèse, ils ont testé soixante participants équipés d'un SSD auditif qui détecte les contrastes de lumières (différent du vOICe). Tous les participants avaient les yeux bandés et ils n'avaient aucune information sur le fonctionnement de l'appareil. Ils étaient séparés en cinq groupes qui représentaient cinq conditions différentes :

1. Les participants pouvaient bouger, sur l'axe horizontal, un bâton sur lequel une source lumineuse était placée au bout ;
2. Les participants pouvaient seulement bouger leur corps alors que la source lumineuse restait fixe devant eux ;
3. Condition identique à la première, sauf que six sources lumineuses en retrait sont présentes pour simuler des points de référence auditifs (bruit de fond) ;
4. Les participants manipulaient directement la source lumineuse ;
5. Condition contrôle dans laquelle les participants entendaient des sons qui ne correspondaient à aucune logique.

Ils ont découvert que dans toutes les conditions sauf la condition contrôle, les participants ont réussi à associer les stimulations du SSD avec l'objet externe. Un point important à souligner est que le groupe ayant le mieux réussi est celui qui pouvait manipuler directement la source lumineuse, suivi du groupe qui bougeait seulement leur corps alors que l'objet était fixe. Ces résultats démontrent l'importance des rétroactions sensorimotrices lorsqu'elles sont liées directement à la source de stimulation dans le processus d'attribution distale. Celles-ci permettent à l'individu d'acquérir les informations nécessaires pour calibrer son environnement avec ce qu'il entend ou ressent. Une fois que les trois phases de l'attribution distale sont atteintes, l'utilisateur perçoit les sensations produites par le SSD comme étant un objet loin dans l'espace et non comme simplement des sensations auditives ou tactiles (Auvray et al., 2005; Auvray et al., 2007; Siegle & Warren, 2010). Par exemple, les utilisateurs du TDU ne ressentent plus les stimulations électriques sur leur peau, mais attribuent directement la cause des stimulations à un objet distant, comme s'ils le percevaient au loin (Bach-y-Rita, 1972; Bach-y-Rita & Kercel, 2003; White et al., 1970). D'autres études ont démontré le même processus avec le vOICe (Auvray, 2019; Hartcher-O'Brien & Auvray, 2014).

4.4 Substitution sensorielle en tant qu'aide à la navigation

4.4.1 Aides à la navigation

Bien qu'ils aient des habiletés spatiales fonctionnelles, les aveugles sont limités dans la quantité d'informations spatiales qu'ils peuvent traiter. Cela diminue leur capacité d'adaptation face à l'environnement. Ces derniers font donc face à beaucoup de difficultés lors de leurs déplacements. Pour faciliter leur navigation, ils ont accès à plusieurs types d'aides comme la canne blanche, le chien guide et le GPS (Wiener et al., 2010). La canne permet la détection d'obstacles basés au sol, mais son utilisation est restreinte à l'espace péripersonnel de l'individu (Suterko, 1967). Le chien guide simplifie la tâche en prenant en charge la planification de la route et l'évitement des obstacles, mais ne permet pas la détection de points de référence (Riazi et al.,

2016). Le GPS facilite l'orientation de l'utilisateur, mais ne lui fournit aucune information sur les obstacles qu'il peut rencontrer sur son chemin (Wiener et al., 2010). En complétant ou en remplaçant ces aides, les SSDs ont le potentiel de fournir les informations manquantes aux aveugles afin qu'ils deviennent efficaces dans leurs déplacements. En effet, ces appareils permettent de mettre à jour de la distance entre l'individu et les obstacles tout en augmentant la distance de détection, facilitant l'exploration de l'espace et permettant le repérage des points de références pour enrichir les cartes cognitives (Chebat et al., 2018). Les SSDs ont le pouvoir d'améliorer les deux aspects de la navigation soient la locomotion et la planification de la route (Montello & Sas, 2006).

4.4.2 SSDs et navigation en situations expérimentales

Beaucoup de chercheurs ont testé l'utilisation des SSDs dans la navigation. En utilisant le TDU, des AP ont surclassé des CV dans un couloir à obstacles de grandeur réelle (Chebat et al., 2011). De plus, après avoir été entraîné avec le TDU, les aveugles utilisent une combinaison de stratégies allocentriques et égocentriques pour naviguer. Cela démontre qu'ils sont capables d'intégrer les informations spatiales fournies par les SSDs puisque normalement, ils préfèrent des stratégies égocentriques. Cette même étude a aussi révélé que le p-hip postérieur, le cortex pariétal postérieur et le cortex occipito-temporal étaient recrutées chez les AP dans ces tâches de navigation visuo-tactile. Ces activations furent aussi observées lorsque les voyants ont navigué avec les yeux ouverts alors qu'elles étaient absentes lorsqu'ils avaient les yeux bandés. Dans cette condition, les CV semblaient utiliser d'avantage leur cortex préfrontal, une région impliquée dans la prise de décision (Kupers et al., 2010). Ces résultats démontrent que la plasticité intermodale engendrée par l'expérience en déficience visuelle a adapté leur système neuronal de navigation pour qu'ils puissent utiliser le tactile au lieu de la vision. En effet, pour la détection et l'évitement des obstacles avec le TDU, autant les AP que les voyants recrutent la voie dorsale (lobe temporal médial). Concernant la détection des obstacles, les AP recrutent un réseau moteur additionnel, ce qui n'est pas observé chez les voyants (Chebat et al., 2020b).

Très peu se sont intéressés à la navigation avec le vOICe. Ceci est surprenant puisqu'il offre une résolution spatiale supérieure au TDU (Proulx, Ptito, et al., 2014). Certains ont démontré qu'il permet la détection et l'identification d'objets (Brown et al., 2011; Proulx & Harder, 2008). De plus, une étude récente a évalué la capacité d'individu en déficience visuelle (3 AP, 1 AT et 2 en basse vision) et de CV à repérer des objets dans l'environnement et ensuite les atteindre physiquement en utilisant le vOICe. Les individus en déficience visuelle ont non seulement mieux réussi la tâche, mais ils ont montré un apprentissage plus grand que les CV (Jicol et al., 2020).

5. Problématique, objectifs et hypothèses de recherche

5.1 Problématique

Les SSDs procurent une « vision fonctionnelle » aux aveugles. Ils ont donc le potentiel d'aider grandement le quotidien de ces gens. Pourtant, ils sont très peu utilisés par ces derniers. De plus, seulement une faible quantité d'individus en déficience visuelle connaissent l'existence de ces appareils. Pourquoi est-ce que ce domaine prometteur ne parvient donc pas à sortir des laboratoires? En fait, plusieurs problèmes découlent des SSDs et ceux-ci doivent être réglés avant qu'ils deviennent des outils de confiance. Cette problématique sera donc discutée dans la prochaine section.

5.1.1 La complexité des SSDs

Comme nous avons pu voir dans la section sur les appareils de substitution sensorielle (section 4.2), ces derniers transforment l'information visuelle en signaux tactiles ou auditifs. Le TDU et le vOICe par exemple, transmettent toutes les informations disponibles qui sont capturées par la caméra afin d'offrir à l'utilisateur une perception qui ressemble à une vision normale. Pour cette raison, ils donnent un signal complexe à l'individu (Chebat et al., 2018). Celui-ci doit analyser le signal, extraire les informations pertinentes à la tâche qu'il veut faire pour ensuite les intégrer et prendre une décision. Donc, plus le signal est complexe, plus il est difficile d'atteindre le cercle moteur décrit dans la figure 4 (page 49). De plus, la charge cognitive demandée dans ce processus

est proportionnelle à la complexité du signal (Loomis et al., 2012). Les individus doivent donc être concentrés sur de longues périodes de temps, ce qui peut les épuiser et rendre l'utilisation difficile.

L'entraînement est un autre aspect qui est influencé par la complexité des SSDs. Plus le signal offert est complexe, plus les utilisateurs doivent suivre un entraînement intense. Par exemple, pour mesurer l'acuité avec le E de Snellen, les participants de l'étude sur le TDU ont nécessité 7 heures d'entraînement alors que pour le vOICe, ils ont eu 73 heures d'entraînement (Chebat, Rainville, et al., 2007; Striem-Amit, Guendelman, et al., 2012). Bien que certains ont publié des exercices d'entraînement pour le vOICe (Reynolds & Glenney, 2009), ils restent très minimes et aucun suivi n'est disponible pour évaluer leur apprentissage. Dans les cours en orientation et mobilité (O&M), les individus en déficience visuelle sont guidés par des spécialistes en O&M dans toutes les phases d'entraînement, ce qui facilite leur apprentissage des aides comme la canne blanche et le chien guide. De plus, dans la majorité des études, l'entraînement est supervisé par les expérimentateurs qui ne sont pas nécessairement des O&M ou des spécialistes de la substitution sensorielle. La complexité d'utilisation et d'apprentissage des SSDs est donc un aspect décourageant pour les déficients visuels. Surtout qu'ils ont déjà appris à utiliser d'autres aides en mobilité comme la canne et le chien guide.

5.1.2 Les limitations des appareils et leur inaccessibilité

Certains SSDs sont plus appropriés pour des tâches que d'autres et vice versa. Cependant, aucun système n'est assez adéquat pour être utilisé quotidiennement par les aveugles. Le TDU, par exemple, n'offre aucune information sur la profondeur de l'environnement. Ce manque d'information peut nuire à leur capacité à éviter des obstacles qui sont au sol (Chebat et al., 2011). Aussi, le TDU nécessite un contraste élevé. Son algorithme fait en sorte qu'il transmet en signal visuo-tactile seulement les différences de contrastes. Les expériences de navigation effectuées avec celui-ci étaient toutes faites selon des conditions expérimentales où les contrastes étaient maximisés. Ceci est une contrainte énorme puisque l'environnement normal est à faibles contrastes. De plus, en raison des nombreuses études effectuées avec le TDU, il se vend à

plusieurs milliers de dollars. Il est donc peu accessible pour les individus en déficience visuelle. Quant au vOICe, il rafraîchit le signal seulement à toutes les secondes. Cela cause donc un délai avant que l'utilisateur reçoive les informations nécessaires et ce délai peut mettre l'individu dans une situation de danger. Lorsqu'il est en mouvement ou qu'il est dans un environnement dynamique, il pourrait ne pas recevoir le signal assez rapidement pour éviter un obstacle (Chebat et al., 2018; Ward & Meijer, 2010). En revanche, il est téléchargeable gratuitement sur des téléphones intelligents, ce qui le rend plus accessible. Néanmoins, sa complexité le rend peu populaire.

5.1.3 Nouveaux développement de SSDs

Désormais, les chercheurs tentent de développer des SSDs qui sont plus simples d'utilisation et plus accessibles que les SSDs classiques. Le Eyecane est un appareil récemment développé qui informe son utilisateur, avec des vibrations, de la distance qui le sépare avec l'obstacle qu'il pointe (Maidenbaum et al., 2014). Son système simpliste permet aux aveugles de détecter et éviter des obstacles (Buchs et al., 2014) ainsi que de naviguer autant dans des environnements réels que virtuels (Chebat et al., 2015). Ce système encore en développement, a le potentiel de devenir plus important pour les aveugles. Cependant, le problème d'inaccessibilité persiste. Il est disponible seulement dans quelques pays et il se vend à quelques centaines de dollars. Bien que le prix soit une nette amélioration lorsque comparé au TDU, il demeure dispendieux lorsque l'on compare à la canne blanche à laquelle ils ont accès gratuitement. À noter que le Eyecane est donné gratuitement aux aveugles en Israël. À voir si d'autres pays vont adopter cette pratique.

5.2 Objectifs

Dans cette étude, nous tentons de pallier à cette problématique à laquelle font face les SSDs classiques. Pour ce faire, nous testons un nouveau SSD simple et accessible développé par notre laboratoire. Il s'agit d'une application téléchargeable sur un téléphone intelligent. L'application utilise les caméras en arrière du téléphone pour capter l'environnement. Ensuite,

son algorithme analyse les images captées et les transforme en signaux auditifs à l'aide d'écouteurs à conduction osseuse. Ce dernier fournit à l'utilisateur des informations strictement pertinentes à la navigation, à la détection et l'évitement d'obstacles. En utilisant un système de sons spatialisés horizontalement, il offre deux modes : le mode Détection et le mode Évitement. En mode Détection, l'appareil détecte les obstacles directement devant l'utilisateur (à 0 degré). Avec ce mode, l'utilisateur explore activement son environnement pour détecter des points de repères et des obstacles. En mode Évitement, une cartographie 3D de l'environnement est créée par l'appareil, ce qui donne des informations de distance et de position sur tous les obstacles à proximité de l'utilisateur. De cette façon, l'individu obtient un champ de vision de 170 degrés devant lui, dès lors facilitant la planification de sa route à travers les obstacles. Dans les deux modes, le SSD donne un signal auditif simple et facile d'interprétation (voir Article pour les détails). Trois groupes de participants sont à l'études : les AP, les AT et les CV. Ils seront testés dans un couloir à obstacles dans lequel ils devront accomplir deux tâches. La première tâche utilise le mode Détection et elle consiste à détecter les obstacles, les atteindre physiquement ainsi qu'à traverser le couloir le plus rapidement possible. Dans la deuxième, les participants utilisent le mode Évitement pour traverser le couloir le plus rapidement possible tout en évitant les obstacles.

5.3 Hypothèses

Notre première hypothèse est que tous les participants vont être en mesure d'utiliser l'appareil. Ensuite, nous proposons que le système de sons spatialisés horizontalement fournit les informations nécessaires pour la navigation spatiale. Étant donné que les aveugles sont meilleurs que les voyants pour localiser les sons sur l'axe horizontal (Kupers & Ptito, 2014; Proulx, Brown, et al., 2014), nous croyons qu'autant les AP que les AT vont mieux performer que les CV dans la détection d'obstacle, l'évitement d'obstacle et les temps de traversée du couloir. De plus, les AP devraient être meilleurs que les AT.

Article

(Sous révision à PloS One depuis le 13 août 2020)

Accusé de réception de PloS One

----- Forwarded message -----

From: **PLOS ONE** <em@editorialmanager.com>

Date: Thu, Aug 13, 2020 at 3:15 PM

Subject: Submission Confirmation for PONE-D-20-25379 - [EMID:6cb3365219a20750]

To: Maurice Ptito <ptito.maurice@gmail.com>

PONE-D-20-25379

Spatial navigation with horizontally spatialized sounds in early and late blind individuals
PLOS ONE

Dear Dr. Ptito,

Thank you for submitting your manuscript entitled 'Spatial navigation with horizontally spatialized sounds in early and late blind individuals' to PLOS ONE. Your assigned manuscript number is PONE-D-20-25379.

We will now begin processing your manuscript and may contact you if we require any further information. You will receive an update once your manuscript passes our in-house technical check; you can also check the status of your manuscript by logging into your account at <https://www.editorialmanager.com/pone/>.

If during submission you selected the option for your manuscript to be posted on the bioRxiv preprint server (<http://biorxiv.org>), we will be assessing the manuscript for suitability shortly. If suitable, your preprint will be made publicly available on bioRxiv and you will receive an email confirmation from them when it has posted. Please check your response to this question and email us as soon as possible at plosone@plos.org if it has been answered incorrectly. Further information about our partnership with bioRxiv to facilitate the rapid availability of life sciences research is available at <http://journals.plos.org/plosone/s/preprints>.

If you have any inquiries or other comments regarding this manuscript please contact plosone@plos.org.

Thank you for your support of PLOS ONE.

Kind regards,
PLOS ONE

Spatial navigation with horizontally spatialized sounds in early and late blind individuals

Samuel Paré¹, Maxime Bleau¹, Ismaël Djerourou¹, Vincent Malotaux², Ron Kupers^{1,2,3}, Maurice Ptito^{1,3}

¹École d'optométrie, Université de Montréal, Québec, Canada

²Institute of Neuroscience, Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium

³Institute of Neuroscience and Pharmacology (INF), University of Copenhagen, Denmark

Abstract

Blind individuals often report difficulties to navigate and to detect objects placed outside their peri-personal space. Although classical sensory substitution devices could be helpful in this respect, these devices often give a complex signal which requires intensive training to analyze. New devices are therefore needed that provide a less complex output signal. Here, we evaluate a smartphone-based sensory substitution device that offers navigation guidance based on strictly spatial cues in the form of horizontally spatialized sounds. The system uses multiple sensors to either detect obstacles at a distance directly in front of the user or to create a 3D map of the environment (detection and avoidance mode, respectively), and informs the user with auditory feedback. We tested 11 early blind, 12 late blind and 24 blindfolded-sighted participants for their ability to detect obstacles and to navigate in an obstacle course. The three groups did not differ in the number of objects detected and avoided. However, early blind and late blind participants were faster than their sighted counterparts to navigate through the obstacle course. These results are consistent with previous research on sensory substitution showing that vision can be replaced by other senses to improve performance in a wide variety of tasks in blind individuals. This study offers new evidence that sensory substitution devices based on horizontally spatialized sounds can be used as a navigation tool with a minimal amount of training.

Introduction

Vision is the most important aspect for spatial navigation and mobility in humans; it is constantly used for movement guidance, route planning and orientation. Therefore, visually impaired individuals face several challenges when navigating, such as disorientation, detecting and avoiding obstacles [1]. Thanks to the long cane and guide dogs, some of these issues can be addressed. For instance, ground based obstacles can be detected by the cane or avoided by the guide dog but obstacles above waist remain problematic [2]. Nevertheless, blind individuals lack navigational independency [3]. For this reason, sensory substitution devices (SSDs) [4, 5] have been developed to bring visual information through other sensory modalities [6, 7] such as audition [8] or touch [9, 10]. Following training, SSDs help visually impaired individuals to navigate efficiently in laboratory environments [11-15]. However, these studies mostly involved visual-like SSDs, meaning that they translate many types of visual information captured by a camera into either auditory (vOICe) or tactile (Tongue Display Unit) cues to provide a “visual-like” experience [16-18]. In these cases, the user must analyze all the information given by the SSDs to extract what is useful, a process that imposes a heavy load on cognitive resources, often creating a feeling of exhaustion [4, 19]. In addition, participants must sometimes go through rather intensive training programs to get proficient results with such devices. There is hence a need for more effective SSDs that provide more pertinent and specific information needed for navigation.

SSDs provide information relevant for navigation by processing the raw visual data, extracting only spatial information (i.e. depth and position) and delivering it in a simple and meaningful format. Contrary to other devices like the TDU or the vOICe, a SSD for guidance, or guidance-SSD (GSSD), can minimize the strain on attentional resources, and therefore shorten the

user's reaction time. In this study, we investigate the potential of a newly developed GSSD that uses horizontally spatialized sounds as its sole feedback of the spatial configuration of the environment. Here, we define horizontally spatialized sounds as the combined auditory cues that allow the localization of objects on the horizontal plane using a polar coordinate system (radial and angular coordinates) with the user as the origin point.

Given the established spatial auditory capacities of the blind [10, 20], we hypothesize that horizontally spatialized sounds provide the necessary information for spatial navigation. When confronted with obstacles in their path of travel, participants should be able to create a cognitive map of their surroundings, to update their position in space and to avoid collisions successfully. Therefore, our goal was to investigate if participants can detect and avoid obstacles in a life-size obstacle course using this new system to guide their movements.

We included early blind (EB), late blind (LB) and blindfolded sighted control subjects (SC) in a detection and avoidance task. We hypothesized that participants would be able to perform both tasks with a minimum amount of training, that both blind groups would outperform SC and that EB would be better than LB.

Methodology

Participants and Ethics

A total of 12 EB (mean age: 45 ± 10 ; 5 females), 11 LB (mean age: 40 ± 12 , 8 females) and 24 SC (mean age: 40 ± 12 , 11 females) participated in the study. Not all participants completed both parts of the study (3 EB, 1 LB and 7 SC did not complete the navigation task while 3 LB and

1 SC did not complete the detection task for reasons of time and availability). Participants were recruited from the Institut Nazareth et Louis-Braille (INLB) in Montreal (Canada) and the BRAINlab of the University of Copenhagen (Denmark). Age and sex-matched control subjects were also recruited from the Montreal and Copenhagen area. All LB participants had acquired blindness at the age of 16 or older. To evaluate the influence of experience-dependent plasticity in the LB group, we calculated the blindness duration index (BDI) according to the formula “(age-age onset blindness)/age” (as described in [21]). The BDI score can vary from 0 to 1, expressing the relative amount of time a person has been blind, with low scores indicating recent onset of blindness and high scores long duration of blindness. The average BDI was 0.52 ± 0.16 (range: 0.13 till 0.66) while the mean onset of blindness was 21.4 ± 6.6 years. All blind participants were users of the long cane, while three of them mainly used a guide dog. None of the participants had associated neuropathy or other pathology that could affect navigation performance and mental spatial representation. Demographic data of the blind participants can be found in Table 1. All participants were blindfolded during the experiment. The experimental protocol was approved by the Comité d’éthique de la recherche Clinique de l’Université de Montréal (CERC-19-097-P) and all participants provided written informed consent before the experiment.

Table 1. Blind participants’ characteristics

Participants	Age & Sex	Blindness Onset (years)	BDI ^a	Cause	Residual Perception	Participants	Age & Sex	Blindness Onset	Cause	Residual Perception
LB1	55F	24	0.56	RP ^b	LP ^c	EB1	56M	Perinatal	ROP ^d	-
LB2	25M	17	0.32	RP	-	EB2	49F	Perinatal	ROP	-
LB3	50M	17	0.66	A ^e	-	EB3	44F	Perinatal	ROP	-
LB4	44F	17	0.61	GL ^f	-	EB4	31F	Perinatal	ROP	-
LB5	56F	20	0.64	RC ^g	-	EB5	18M	Perinatal	ROP	-
LB6	47F	22	0.53	DR ^h	-	EB6	49M	Perinatal	ROP	-

LB7	44F	17	0.61	GL	-	EB7	33M	Perinatal	ROP	-
LB8	56F	20	0.64	RC	-	EB8	49F	Perinatal	ROP	-
LB9	47F	22	0.53	DR	-	EB9	34F	Perinatal	ROP	-
LB10	38F	20	0.47	GL	-	EB10	46M	Perinatal	ROP	-
LB11	46M	40	0.13	M ^a	-	EB11	49M	Perinatal	ROP	-
						EB12	28M	Birth	LA ^c	LP

¹**LB**: late blind; ²**EB**: early blind; ³**BDI**: blind duration index; ⁴**RP**: retinitis pigmentosa; ⁵**LA**: Leber's amaurosis; ⁶**M**: meningitis; ⁷**A**: accident; ⁸**GL**: glaucoma; ⁹**RC**: retinal cancer; ¹⁰**DR**: diabetic retinopathy; ¹¹**ROP**: retinopathy of prematurity; ¹²**LP**: light perception.

Apparatus

The navigation system uses a Lenovo Phab 2 Pro smartphone, bone conducting headphones and a headset supporting the smartphone at eye-level (see Fig 1A). The smartphone is equipped with a Qualcomm Snapdragon 652 processor, a 4050 mAh battery, 4 GB of RAM, and uses Android 6.0. The smartphone has an RGB camera, a depth camera and a motion tracking fisheye camera. For this experiment, the phone is placed in a custom head mount adjusted so the cameras are at eye-level (see Fig 1D).

The GSSD uses horizontally spatialized sounds to convey visual information to the user. Using the phone's cameras, the system can detect tangible objects within a 3-meter radius in front of the user and signal their location in the horizontal plane through sonification. The auditory signal encodes the objects' polar coordinates in relation to the user. To convey the angular coordinate, or the objects' azimuth related to the user, the system uses binaural differences, thus creating a possible 360-degree audio feedback. To signal the radial coordinate, or the distance between the object and the user, the system uses a combination of three previously tested sonification strategies [22]: 1. Beep Repetition Rate (BRR), where the interval

between each beep correlates positively with distance; 2. Sound Fundamental Frequency (SFF), whereby the sound frequency (pitch for the user) correlates negatively with distance; and 3. Sound Intensity (SI) which also correlates negatively with distance. Thus, when the user approaches an obstacle, the combination of the three components (the time between the beeps shortens while the pitch and the SI get higher) allows the user to estimate the distance accordingly.

The GSSD software installed on the smartphone offers a *detection* and *avoidance* mode. Both modes use horizontally spatialized sounds but in two different ways. The Detection mode offers only one sound source, which is a straight line directly in front of the user (0-degree angle). The Avoidance mode uses the cameras' whole field-of-view (170 degrees) to convey information about every tangible object that could be in the user's path of travel. Thus, the user can simultaneously hear multiple objects and plan his/her movements to avoid collisions. Obstacles behind the user are no longer sonified to avoid cognitive overload.

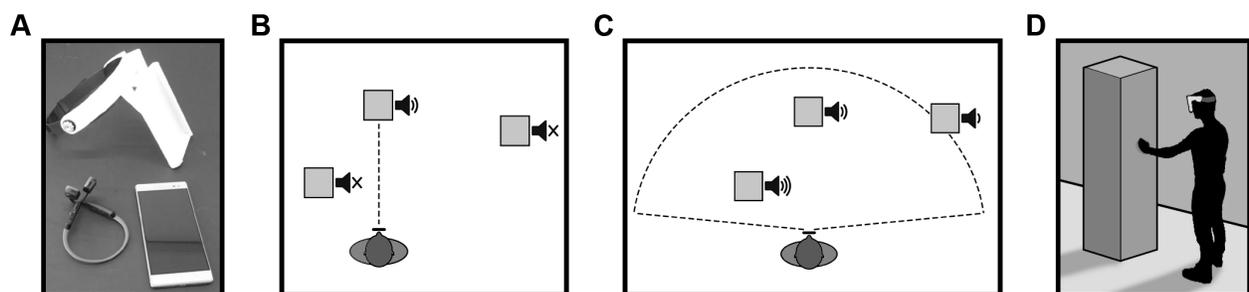


Fig 1. The apparatus and the two modes offered by the system.

(A) The custom head mount, the bone-conducting headphones (lower left) and the Lenovo Phab 2 Pro smartphone. (B). In detection mode, auditory feedback is given about one point in space. The system indicates the presence of a tangible object in a straight line in front of the user (angle: 0-degree, range: 3 meters). (C). The avoidance mode's feedback consists in a 3D audio construct of the environment; it detects everything in the fisheye camera's field of view and renders every tangible surface location in relation to the user (range: 3 meters). Squares represent obstacles, speaker icons illustrate the sound heard by the participant. The more bars there are, the higher the BRR, SF and SI. An X illustrates the absence of sound. (D) A blindfolded participant using the

device to reach an obstacle. The device is head-mounted so the camera is at eye-level and facing towards the environment in front of the participant.

Experimental walkway

The life size obstacle course consisted of a corridor (21m long, 2,4m wide) where six obstacles were placed 3 meters apart from each other on the longitudinal axis, but randomly placed on the horizontal axis. The obstacles were made of cardboard boxes (L: 0.45m; I 0.4m; H: 1.9m) to avoid injury on impact.

Tasks

In the obstacle detection task, participants had to locate, point at (with a laser pointer) and reach obstacles. At the same time, they were told to walk as quickly as possible while making the fewest amount of errors possible. The pointing was used to ensure that the participants had correctly detected an obstacle and not a wall. Therefore, pointing at something other than an obstacle was considered a false alarm. In the navigation task, participants were told to cross the walkway as quickly as possible, thereby avoiding any collisions with obstacles or walls.

Both tasks consisted of six runs (12 trials in total; one trial represents a single crossing of the corridor). The participants were not aware of the number of obstacles placed along the hallway, and all obstacles changed place after each run. Every participant walked through the same six configurations for each mode (12 different configurations in total, see Fig 2A). The avoidance and detection tasks were executed on different days.

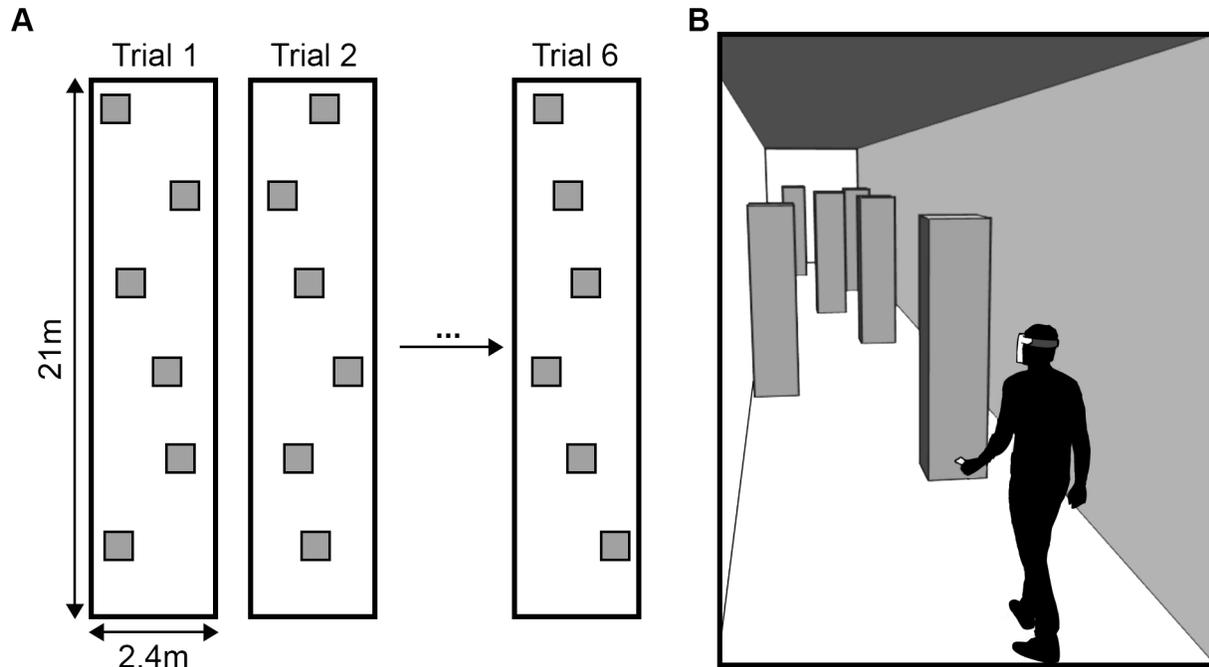


Fig 2. Experimental Design.

(A) The corridor's dimensions and examples of obstacle configurations. The obstacles are represented by grey squares. (B) Representation of the corridor with obstacles placed randomly on the horizontal axis and 3 meters apart from each other.

Familiarization

Prior to the onset of the tasks, participants were explained the principles of usage for each mode, after which they were familiarized with the device. They were encouraged to interact with the device by waving their hands in front of the phone's cameras and paying attention to the auditory feedback. The participants were then placed in front of one obstacle. They were taught how to link the auditory feedback to the distance separating them from the object, how to detect an obstacle which is in the middle of the corridor, how to differentiate it from the wall and how to detect an obstacle placed against a wall. The participants could touch the obstacle to associate the auditory feedback with the tactile information. We then performed a simulation of the task

with 3 obstacles placed 3 meters apart to assess the participant's understanding of the task. The familiarization process never lasted more than 30 to 40 minutes.

Statistical analysis

Data were analyzed using JASP, an open-source graphical program for statistical analysis, developed by the University of Amsterdam. Pearson's correlation was used to evaluate if the performance was influenced by duration of blindness in the LB participants. Furthermore, two-way ANCOVAs corrected for age and sex were carried out to compare the groups' ability to detect and avoid obstacles by comparing their average performances together. Since the performances of detection and avoidance had a non-Gaussian distribution, the analyses were confirmed with the Kruskal Wallis intergroup test. Then, we compared the average crossing time between the groups using a two-way ANCOVA corrected for age and sex. This could be achieved because the average crossing time had a Gaussian distribution. The tests were done for both mode of the device. Data are expressed as mean \pm SD. P values of 0.05 were considered as statistically significant.

Results

Obstacle Detection Task

All three groups detected more than 70% of the obstacles. Average detection rates for SC, LB and EB were $79.8 \pm 23.5\%$, $73.3 \pm 23.5\%$ and $78.7 \pm 23.9\%$, respectively (Fig 3A). A two-way ANCOVA corrected for age and sex failed to show a significant group effect for obstacle detection ($F(2,259) = 0.329$, $p = 0.72$). However, a significant effect of age was revealed by the ANCOVA ($F(1,259) = 12.557$, $p < 0.001$). There was also no significant group effect in terms of time needed to finish a

run ($F(2,259) = 1.152, p = 0.32$) Average times to finish a run were 249 ± 97 s, 237 ± 108 s and 259 ± 114 s for SC, LB and EB, respectively (Fig 3B). We did not find, however, a significant correlation between BDI and performance of detection for LB. The analysis also failed to show an effect of sex on performance of detection and crossing time.

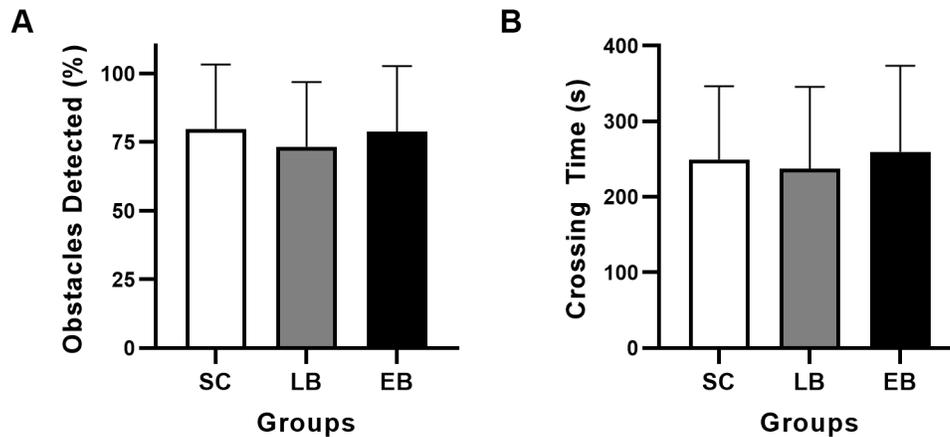


Fig 3. Obstacle detection and average crossing time.

The average performance of detection (A) and crossing time (B) are for the six trials of the task and they are expressed in percentage of correctly detected and in seconds respectively. SC, sighted control; LB, late blind; EB, early blind.

Navigation Task

For the obstacle avoidance task, performance for EB, LB and SC were $85.1 \pm 16.1\%$, $92.4 \pm 9.9\%$ and $85.9 \pm 17.6\%$, respectively (Fig 4A). The two-way ANCOVA corrected for age and sex failed to show a significant group effect for obstacle detection ($F(2,193) = 2.847, p = 0.06$). However, there was a significant group difference for time needed to finish a run ($F(2,193) = 23.394, p < 0.01$). Average times to finish a run were 180 ± 74 s, 132 ± 64 s and 113 ± 41 s for SC, LB and EB, respectively (Fig 4B). Post-hoc t-tests with Bonferroni correction revealed that EB ($t(154) = -6.328, p < 0.01$) and LB ($t(142) = -4.488, p < 0.01$) were significantly faster than SC to cross the corridor. We did not find, however, a significant correlation between BDI and

performance of avoidance for LB. The analysis also failed to show an effect of sex and age on performance of avoidance and crossing time.

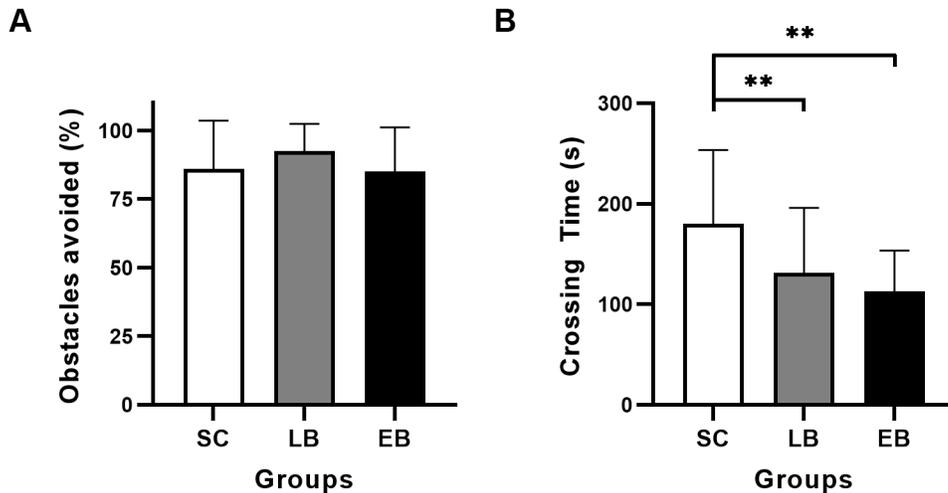


Fig 4. Obstacle avoidance and average crossing time.

The average performance of avoidance (A) and crossing time (B) are for the six trials of the task and they are expressed in percentage of correctly detected and in seconds respectively. Significant differences are indicated by asterisks (** = $p < 0.01$). SC, sighted control; LB, late blind; EB, early blind.

Discussion

The present study shows that EB, LB and SC participants can detect, reach and avoid obstacles using horizontally spatialized sounds. Furthermore, our results show that the GSSD offers a simple audio-to-visual signal that requires little training. Indeed, it took less than thirty minutes of training with the device for all groups to go through the three steps of distal attribution [23] and to obtain performances above 70% of obstacle detection and avoidance. This process is known to be an issue with other SSDs that require intensive training over multiple sessions to be efficient [12, 19].

Obstacle Detection

Contrary to our hypothesis, blind participants did not outperform their sighted counterparts in the detection task. At first glance, these results seem inconsistent with previous studies in the field of sensory substitution, but this could be explained by the fact that the task necessitates scanning the environment using head rotation, extension and flexion movements of the neck, which are underdeveloped in EB [12, 24]. Blind individuals are taught to avoid these types of movements because they can impair balance, straight-line travel and orientation [24-26], which is especially true in LB [27]. The presumed advantage of EB over SC depends on the task and context [28]. The similar performance of EB and SC may be explained by the simplicity of the task, which focuses on the detection part and not on navigation per se. The obstacle course also used large and easily detectable obstacles. Additionally, the fact that younger participants, independently of blindness, were better at detecting obstacles than their elderly peers, is consistent with what is known about the effect of age on navigation and obstacle detection. Indeed, older adults tend to use a more egocentric strategy of navigation while young adults use a combination of egocentric and allocentric strategies [29]. Consequently, the latter more readily detect obstacles [30], thus facilitating their route planning and obstacle circumvention [31].

Navigation

Although the three groups did not differ in the average number of obstacles avoided, EB and LB were significantly faster than SC in finishing the navigation trials. These results are consistent with other studies which also reported that EB are more efficient in the use of SSDs [13, 14, 32]. In fact, when using such devices, the EB brain recruits functional networks used by

sighted individuals for navigation such as the visual dorsal stream and the parahippocampal gyrus while blindfolded SC do not [33]. A recent study also showed that EB recruit a sensorimotor network when learning a spatial navigation task using the TDU, a tactile-to-vision SSD, while their sighted counterparts do not [34]. Alternatively, our results could also be explained by the fact that it is unusual for SC to navigate blindfolded, while it is the daily experience of the other two groups. Indeed, the navigation task required the participants to not only detect the obstacles, but also to constantly adjust his/her position to avoid collisions. In other words, a navigation task necessitates higher cognitive spatial processing than an obstacle detection task [35]. This could have transcribed into increased transit times and moderation of pace for SC when deprived of vision and guided only with new auditory cues.

Along with EB, LB were also significantly faster than SC in the navigation task. Since the avoidance mode requires analyzing the environment from a wide angle, participants received auditory inputs from multiple sound sources simultaneously, allowing them to plan their route without the need for head movements known to impair balance. On one hand, studies have shown that simultaneous multiple sound sources improve postural control in LB and EB [36]. On the other hand, these results are consistent with studies revealing that LB and EB are better at localizing sounds in the periphery [37], which plays an important role in resolving the navigation task. Indeed, to advance, the participants had to orient themselves to place all sounds far enough in the periphery to free the space upwards and avoid collisions with the obstacles.

Sensory substitution devices

SSDs like the TDU and the vOICe were designed with the goal to bring back a functional level of vision. However, by translating the whole scene of a camera into tactile or auditory stimuli, they give a complex signal which the user must analyze to extract useful information from. Moreover, these devices do not give direct information about depth which is important for navigation [8, 38]. Indeed, visual-like SSDs require the user to move the head to grasp the environment within its visual-field and then to analyze the area of the visual-field occupied by the object to extract distance information [23]. This is a quasi-automatic process under normal vision, consequently unknown and laborious to understand for EB individuals. This has been demonstrated with EB individuals unable to perceive the Ponzo illusion with a visual-to-auditory SSD, while it was perceived by SC and LB [39]. For this reason, a device using horizontally spatialized sounds giving only spatial information seems to have potential to achieve navigational independency. We therefore claim that our audio-guidance-SSD minimizes the cognitive load for the user. This could translate into a better ease of use and faster learning rate. Moreover, our system offers a user-friendly interface that allows the modification of important settings. For instance, the user can personalize his/her experience by choosing between a variety of sounds. The user can also adjust the horizontal and vertical field of view of the system, as well as the detection range of the system, to adequately deal with closed narrow and open environments. We therefore believe that our device can bring better subjective appreciation than other SSDs. However, further research using more complex navigation tasks and navigation in real life environments are needed.

Conclusion

We show that it is possible to detect and avoid obstacles using only horizontally spatialized sounds. Furthermore, we investigated the influence of visual experience on the use of an auditory SSD for navigation and our data shows that LB navigate as efficiently as EB with the device. Moreover, this study sheds light on two principles of design for future SSDs. First, it is primordial to reduce the device complexity by regulating the amount of information given to the user. Second, behavioral habits and abilities taught in orientation and mobility training are important factors that need to be considered when using SSDs. To better understand these concepts, future studies could investigate the comparison between a visual-like SSD and a guidance SSD in a single experimental setup.

Acknowledgements

The authors wish to thank Chuck Knowledge and Danny Bernal from SignalGarden for developing the GSSD software.

References

1. Scott AC, Barlow JM, Guth DA, Bentzen BL, Cunningham CM, Long R. Nonvisual cues for aligning to cross streets. *Journal of visual impairment & blindness*. 2011;105(10):648-61.
2. Manduchi R, Kurniawan S. Mobility-related accidents experienced by people with visual impairment. *AER Journal: Research and Practice in Visual Impairment and Blindness*. 2011;4(2):44-54.
3. Giudice NA, Legge GE. Blind navigation and the role of technology. *The engineering handbook of smart technology for aging, disability, and independence*. 2008;8:479-500.

4. Maidenbaum S, Abboud S, Amedi A. Sensory substitution: closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev.* 2014;41:3-15. Epub 2013/11/28. doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.11.007. PubMed PMID: 24275274.
5. Proulx MJ, Ptito M, Amedi A. Multisensory integration, sensory substitution and visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev.* 2014;41:1-2. Epub 2014/04/25. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.03.004. PubMed PMID: 24759484.
6. Scheller M, Petrini K, Proulx MJ. Perception and interactive technology. *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience.* 2018;2:1-50.
7. Proulx MJ, Gwinnutt J, Dell'Erba S, Levy-Tzedek S, de Sousa AA, Brown DJ. Other ways of seeing: From behavior to neural mechanisms in the online "visual" control of action with sensory substitution. *Restorative neurology and neuroscience.* 2016;34(1):29-44.
8. Meijer PB. An experimental system for auditory image representations. *IEEE transactions on biomedical engineering.* 1992;39(2):112-21.
9. Bach-y-Rita P. *Brain mechanisms in sensory substitution:* Academic Press Inc; 1972.
10. Kupers R, Ptito M. Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews.* 2014;41:36-52.
11. Stoll C, Palluel-Germain R, Fristot V, Pellerin D, Alleysson D, Graff C. Navigating from a depth image converted into sound. *Applied bionics and biomechanics.* 2015;2015.
12. Chebat D-R, Harrar V, Kupers R, Maidenbaum S, Amedi A, Ptito M. Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness. *Mobility of Visually Impaired People:* Springer; 2018. p. 167-200.

13. Chebat DR, Schneider FC, Kupers R, Ptito M. Navigation with a sensory substitution device in congenitally blind individuals. *Neuroreport*. 2011;22(7):342-7. Epub 2011/04/01. doi: 10.1097/WNR.0b013e3283462def. PubMed PMID: 21451425.
14. Chebat DR, Maidenbaum S, Amedi A. Navigation using sensory substitution in real and virtual mazes. *PLoS One*. 2015;10(6):e0126307. Epub 2015/06/04. doi: 10.1371/journal.pone.0126307. PubMed PMID: 26039580; PubMed Central PMCID: PMC4454637.
15. Maidenbaum S, Levy-Tzedek S, Chebat DR, Namer-Furstenberg R, Amedi A. The effect of extended sensory range via the EyeCane sensory substitution device on the characteristics of visionless virtual navigation. *Multisens Res*. 2014;27(5-6):379-97. Epub 2015/02/20. doi: 10.1163/22134808-00002463. PubMed PMID: 25693302.
16. Auvray M, Hanne-ton S, O'Regan JK. Learning to perceive with a visuo—auditory substitution system: localisation and object recognition with 'The Voice'. *Perception*. 2007;36(3):416-30.
17. Kaczmarek K. The tongue display unit (TDU) for electrotactile spatiotemporal pattern presentation. *Scientia Iranica*. 2011;18(6):1476-85.
18. Ward J, Meijer P. Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Conscious Cogn*. 2010;19(1):492-500. Epub 2009/12/04. doi: 10.1016/j.concog.2009.10.006. PubMed PMID: 19955003.
19. Elli GV, Benetti S, Collignon O. Is there a future for sensory substitution outside academic laboratories? *Multisens Res*. 2014;27(5-6):271-91. Epub 2015/02/20. doi: 10.1163/22134808-00002460. PubMed PMID: 25693297.

20. Proulx MJ, Brown DJ, Pasqualotto A, Meijer P. Multisensory perceptual learning and sensory substitution. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2014;41:16-25.
21. Meaidi A, Jennum P, Ptito M, Kupers R. The sensory construction of dreams and nightmare frequency in congenitally blind and late blind individuals. *Sleep Medicine*. 2014;15(5):586-95.
22. Bazilinskyy P, van Haarlem W, Quraishi H, Berssenbrugge C, Binda J, de Winter J. Sonifying the location of an object: A comparison of three methods. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(19):531-6.
23. Auvray M, Hanneton S, Lenay C, O'REGAN K. There is something out there: distal attribution in sensory substitution, twenty years later. *Journal of integrative neuroscience*. 2005;4(04):505-21.
24. Rosen S, Crawford J. Teaching orientation and mobility to learners with visual, physical, and health impairments. *Foundations of Orientation and Mobility: Instructional strategies and practical applications*. 2010;3:564-623.
25. Hersh M, Johnson MA. *Assistive technology for visually impaired and blind people*: Springer Science & Business Media; 2010.
26. Ratelle A, Couturier J-A. *Manuel d'intervention en orientation et mobilité*: les Presses de l'Université de Montréal; 2019.
27. Schwesig R, Goldich Y, Hahn A, Müller A, Kohen-Raz R, Kluttig A, et al. Postural control in subjects with visual impairment. *European journal of ophthalmology*. 2011;21(3):303-9.

28. Stronks HC, Nau AC, Ibbotson MR, Barnes N. The role of visual deprivation and experience on the performance of sensory substitution devices. *Brain Res.* 2015;1624:140-52. Epub 2015/07/18. doi: 10.1016/j.brainres.2015.06.033. PubMed PMID: 26183014.
29. Rodgers MK, Sindone III JA, Moffat SD. Effects of age on navigation strategy. *Neurobiology of aging.* 2012;33(1):202. e15-. e22.
30. Silva WS, McFadyen B, Fung J, Lamontagne A. Effects of age on obstacle avoidance while walking and deciphering text versus audio phone messages. *Gerontology.* 2019;65(5):524-36.
31. Moffat SD, Zonderman AB, Resnick SM. Age differences in spatial memory in a virtual environment navigation task. *Neurobiology of aging.* 2001;22(5):787-96.
32. Maidenbaum S, Hanassy S, Abboud S, Buchs G, Chebat DR, Levy-Tzedek S, et al. The "EyeCane", a new electronic travel aid for the blind: Technology, behavior & swift learning. *Restor Neurol Neurosci.* 2014;32(6):813-24. Epub 2014/09/10. doi: 10.3233/RNN-130351. PubMed PMID: 25201814.
33. Kupers R, Chebat DR, Madsen KH, Paulson OB, Ptito M. Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010;107(28):12716-21. Epub 2010/07/10. doi: 10.1073/pnas.1006199107. PubMed PMID: 20616025; PubMed Central PMCID: PMC2906580.
34. Chebat DR, Schneider FC, Ptito M. Neural Networks Mediating Perceptual Learning in Congenital Blindness. *Sci Rep.* 2020;10(1):495. Epub 2020/01/18. doi: 10.1038/s41598-019-57217-w. PubMed PMID: 31949207; PubMed Central PMCID: PMC6965659.
- . Kolarik AJ, Scarfe AC, Moore BC, Pardhan S. Blindness enhances auditory obstacle circumvention: Assessing echolocation, sensory substitution, and visual-based navigation. *PLoS*

One. 2017;12(4):e0175750. Epub 2017/04/14. doi: 10.1371/journal.pone.0175750. PubMed PMID: 28407000; PubMed Central PMCID: PMC5391114.

36. Gandemer L, Parseihian G, Kronland-Martinet R, Bourdin C. Spatial cues provided by sound improve postural stabilization: evidence of a spatial auditory map? *Frontiers in neuroscience*. 2017;11:357.

37. Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Voss P, Lepore F. A functional neuroimaging study of sound localization: visual cortex activity predicts performance in early-blind individuals. *PLoS biology*. 2005;3(2).

38. Ptito M, Moesgaard SM, Gjedde A, Kupers R. Cross-modal plasticity revealed by electrotactile stimulation of the tongue in the congenitally blind. *Brain*. 2005;128(Pt 3):606-14. Epub 2005/01/07. doi: 10.1093/brain/awh380. PubMed PMID: 15634727.

39. Renier L, Laloyaux C, Collignon O, Tranduy D, Vanlierde A, Bruyer R, et al. The Ponzo illusion with auditory substitution of vision in sighted and early-blind subjects. *Perception*. 2005;34(7):857-67. Epub 2005/08/30. doi: 10.1068/p5219. PubMed PMID: 16124271.

Discussion

1. Discussion des résultats

1.1 Détection d'obstacles avec le mode Détection

Les résultats dans la tâche de détection contredisent notre hypothèse de départ. En effet, les aveugles ont obtenu des performances équivalentes à leurs contre pairs voyants, ce qui peut sembler inconsistant avec ce qui est connu sur la substitution sensorielle (Chebat et al., 2018; Chebat et al., 2015; Chebat et al., 2011; Jicol et al., 2020). Cependant, cette équivalence de performance peut être expliquée par le fait que la tâche est concentrée sur la détection d'obstacles et non sur la navigation en tant que telle. La détection d'obstacles à distance est utilisée principalement pour repérer des indices allocentriques (points de référence et obstacles) et pour planifier notre route (Montello & Sas, 2006). Cependant, les aveugles naviguent avec des informations spatiales réduites (via le toucher ou l'audition), ce qui fait en sorte qu'ils développent des stratégies de navigation majoritairement égocentriques (Iachini et al., 2014). C'est pourquoi ils utilisent des repères qu'ils ont détectés dans leur espace péripersonnel avec la canne blanche ou le chien guide (Schinazi et al., 2016). De ce fait, la détection d'obstacles et de repères au loin n'est donc pas aussi importante que chez les voyants. De plus, celle-ci met l'emphase sur l'exploration active de l'environnement (Montello, 2005). Avec le mode Détection du SSD, les participants devaient explorer l'environnement avec des rotations de la tête, des mouvements, des extensions et des flexions du cou. Dans les cours en O&M, les aveugles apprennent à éviter ces mouvements puisqu'ils sont des causes de désorientations et de déséquilibres. Normalement, ils balayent l'espace avec la canne ou ils sont guidés par le chien (Chebat et al., 2018; Rosen & Crawford, 2010). D'ailleurs, plusieurs participants ont exprimé ce problème engendré par le SSD lors de l'expérience :

« Dans la vraie vie, je n'ai pas besoin de tourner la tête. Les obstacles qui ne sont pas devant moi ne sont pas importants. »

« Désolé. Je perds l'équilibre. Je dois avancer lentement ou arrêter complètement sinon j'ai peur de tomber. »

« Il est plus facile de marcher en ligne droite avec le mode évitement. »

Ensuite, les voyants sont désavantagés face aux aveugles par la perte de vision soudaine (bandage des yeux) dans les études sur la substitution sensorielle. Cependant, la supériorité des aveugles sur leurs homologues voyants dans ces expériences dépend de la tâche et du contexte. Si la tâche est trop simple, les CV ont la capacité de performer de façon similaire aux aveugles (Stronks et al., 2015). Effectivement, il se peut que la tâche ait été trop simple. Avec des performances supérieures à 70% dans tous les groupes, cela démontre que les obstacles utilisés étaient larges et facilement détectables. La combinaison des mouvements inhabituels chez les aveugles et la simplicité de la tâche aurait donc ramener au même niveau tous les groupes ce qui expliquerait l'équivalence de performance entre ces derniers.

1.2 Navigation avec le mode évitement

Pour cette tâche, tous les groupes ont réussi à éviter plus de 85% des obstacles. Bien qu'aucune différence significative ne fût trouvée pour le nombre d'obstacles évités, autant les AP que les AT ont été plus rapides pour traverser le couloir que les CV. Ceci est cohérent avec d'autres études sur la substitution sensorielle qui soutiennent que les AP sont plus efficaces que les CV avec des SSDs (Chebat et al., 2011; Jicol et al., 2020; Maidenbaum et al., 2014). D'ailleurs, ces performances supérieures des aveugles sont aussi en accord avec l'hypothèse de supra-capacités auditives chez les aveugles (voir section 2.2 de l'introduction). En effet, les aveugles (AP et AT) ont plus de facilité à localiser les sons périphériques sur l'axe horizontal (Lessard et al., 1998; Voss et al., 2004) et à analyser les indices spectraux des sons. Ces deux aspects étaient très importants pour réussir la tâche puisque les participants devaient constamment se réorienter et se repositionner en fonction des sons pour libérer le chemin devant eux. En d'autres mots, en analysant les caractéristiques des sons, les participants devaient planifier leur route de sorte que les obstacles (sources sonores) n'obstruent pas leur chemin. De surcroît, la littérature en neuroimagerie sur ce domaine corrèle les supra-capacités des aveugles avec la réorganisation intermodale de leur cerveau (Chebat et al., 2020a; Kupers & Ptito, 2014; Proulx et al., 2016). En fait, lorsqu'ils utilisent des SSDs, ils recrutent les mêmes réseaux neuronaux (voie dorsale visuelle

et leur p-hip) que les voyants utilisent pour naviguer alors que ces structures ne sont pas activées lorsque ces derniers ont les yeux bandés. De plus, il a été démontré que les AP utilisent un réseau sensorimoteur supplémentaire lors de leur apprentissage avec le TDU (Chebat et al., 2020b). Bien que cette étude fût effectuée avec un appareil visuo-tactile, rien ne laisse croire que ce recrutement ne soit pas présent avec notre SSD auditif. Il serait intéressant de l'examiner dans une étude IRMf.

Ensuite, une problématique du mode Détection est les mouvements qu'il demande à ses utilisateurs. Le mode Évitement pallie à ce problème avec son système de sons multiples et spatialisés autour de l'utilisateur. En augmentant le champ de vision des utilisateurs, le mode Évitement permet d'acquérir plus d'informations spatiales tout en diminuant les mouvements nécessaires à l'acquisition. Ceci facilite donc la création de leur carte cognitive et améliore leur stabilité. En supplément, des études ont démontré que l'utilisation simultanée de plusieurs sons améliore la posture et la stabilité des AP et des AT lors de mouvements (Gandemer et al., 2017; Schwesig et al., 2011).

Contrairement à la tâche de détection, la navigation demande une charge cognitive plus élevée. En effet, cette tâche nécessitait la détection d'obstacles à proximité, la planification des mouvements pour les éviter et l'exécution de ces mouvements. Il se peut que la tâche ait été trop complexe cognitivement pour que le désavantage des CV soit inobservable (Stronks et al., 2015). Assurément, ce manque d'expérience en navigation sans indice visuel s'est traduit en un ralentissement de leurs actions.

2. Substitution sensorielle et apprentissage perceptuel

Les appareils comme le TDU et le vOICE ont comme optique de fournir à l'utilisateur une vision fonctionnelle. Cependant, ces derniers apportent trop d'informations inutiles à la navigation, ce qui augmente leur complexité d'utilisation. De plus, il n'offre aucune information de distance. La distance est cruciale dans la navigation puisqu'elle permet à l'individu de planifier ses mouvements pour éviter les obstacles (Montello & Sas, 2006). Pour obtenir ce type d'informations avec les SSDs classiques, l'utilisateur doit explorer son environnement, analyser les caractéristiques des objets ainsi que le champ de vision qu'occupent ces derniers pour avoir

une estimation des indices de distance. Ceci est un processus très complexe pour les AP qui sont déficients lorsqu'ils doivent mettre en relation plusieurs indices allocentriques (Gori et al., 2019). Il est aussi une cause d'erreur puisque l'estimation faite par l'individu peut être erronée et ultimement, causer une collision. C'est pourquoi nous argumentons qu'un appareil qui fournit des informations strictement pertinentes à la navigation ait le potentiel d'augmenter l'indépendance des aveugles dans leurs déplacements. Effectivement, avec notre SSD, les AP, les AT et les CV ont l'habileté de détecter, d'atteindre et d'éviter des obstacles. Une qualité majeure du SSD est la simplicité de son signal. Son système de sons spatialisés horizontalement demande peu d'analyse pour être interprété et réduit grandement la charge cognitive demandée pour utiliser l'appareil. En conséquence, le temps d'entraînement est réduit, dès lors augmentant l'appréciation des utilisateurs. En effet, tous les participants ont complété les trois phases de l'attribution distale en moins de 30 minutes d'entraînement alors que ce processus nécessite plusieurs heures avec le TDU (Chebat, Rainville, et al., 2007) et le vOIce (Striem-Amit, Guendelman, et al., 2012). De plus, un point majeur de cette application est son accessibilité. Celle-ci sera éventuellement téléchargeable gratuitement sur les téléphones intelligents, dès lors, la rendant accessible facilement.

3. Perspectives

Ce SSD a été développé dans le but d'offrir un appareil plus efficace et plus agréable que les SSDs classiques comme le TDU et le vOIce. Les prochaines études devraient donc évaluer l'efficacité de ces appareils dans un même environnement expérimental. Un article en 2014 a décrit un couloir à obstacles standardisé qui devrait être utilisé pour comparer plusieurs aides à la navigation (Nau et al., 2014). Il serait intéressant de comparer notre SSD avec le TDU, le vOIce et le Eyecane dans ce couloir. Néanmoins, évaluer le potentiel des SSDs dans des environnements réels comme à l'extérieur ou dans des endroits publics reste primordial pour augmenter le nombre d'utilisateurs des SSDs.

Conclusion

Dans ce projet, la première hypothèse a été confirmée. Effectivement, il a été démontré qu'il est possible d'utiliser le concept de sons spatialisés horizontalement en tant qu'aide à la navigation. Ensuite, la deuxième hypothèse fut confirmée dans certaines conditions et contredite dans d'autres. Celle-ci proposait que les AP soient les plus performants des trois groupes, qu'ils seraient suivis des AT et les CV seraient les moins performants. Tous les groupes ont obtenu des performances équivalentes dans la tâche de détection alors que les AP et les AT ont été plus rapides pour naviguer avec l'appareil. De plus, ce projet met de l'avant l'importance des notions enseignées dans les cours en O&M. En effet, celles-ci sont des facteurs qui ne doivent pas être sous-estimées dans les modalités d'utilisation de ces appareils puisqu'elles influencent les performances des utilisateurs.

Références bibliographiques

- Abboud, S., Hanassy, S., Levy-Tzedek, S., Maidenbaum, S., & Amedi, A. (2014). EyeMusic: Introducing a "visual" colorful experience for the blind using auditory sensory substitution. *Restor Neurol Neurosci*, 32(2), 247-257. doi:10.3233/RNN-130338
- Acredolo, L. (1990). Behavioral approaches to spatial orientation in infancy. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Adelson, E., & Fraiberg, S. (1974). Gross motor development in infants blind from birth. *Child development*, 114-126.
- Aguirre, G. K., Detre, J. A., Alsop, D. C., & D'Esposito, M. (1996). The parahippocampus subserves topographical learning in man. *Cerebral Cortex*, 6(6), 823-829.

- Alary, F., Duquette, M., Goldstein, R., Chapman, C. E., Voss, P., La Buissonnière-Ariza, V., & Lepore, F. (2009). Tactile acuity in the blind: a closer look reveals superiority over the sighted in some but not all cutaneous tasks. *Neuropsychologia*, *47*(10), 2037-2043.
- Amedi, A., Raz, N., Pianka, P., Malach, R., & Zohary, E. (2003). Early 'visual' cortex activation correlates with superior verbal memory performance in the blind. *Nature neuroscience*, *6*(7), 758-766.
- Amedi, A., Stern, W. M., Camprodon, J. A., Bermpohl, F., Merabet, L., Rotman, S., . . . Pascual-Leone, A. (2007). Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nat Neurosci*, *10*(6), 687-689. doi:10.1038/nn1912
- Ammons, C. H., Worchel, P., & Dallenbach, K. M. (1953). " Facial vision": The perception of obstacles out of doors by blindfolded and blindfolded-deafened subjects. *The American Journal of Psychology*, *66*(4), 519-553.
- Apkarian, P. A. (1983). Visual training after long term deprivation: a case report. *Int J Neurosci*, *19*(1-4), 65-83. doi:10.3109/00207458309148647
- Arbel-Yaffe, R., & Amedi, A. (2016). Auditory face identification activates selective areas within the ventral visual stream in congenitally blind. *Journal of Vision*, *16*(12), 1229-1229.
- Auvray, M. (2019). Multisensory and spatial processes in sensory substitution. *Restor Neurol Neurosci*, *37*(6), 609-619. doi:10.3233/RNN-190950
- Auvray, M., Hanne-ton, S., Lenay, C., & O'REGAN, K. (2005). There is something out there: distal attribution in sensory substitution, twenty years later. *Journal of integrative neuroscience*, *4*(04), 505-521.

- Auvray, M., Hanneton, S., & O'Regan, J. K. (2007). Learning to perceive with a visuo—auditory substitution system: localisation and object recognition with 'The Voice'. *Perception*, 36(3), 416-430.
- Axelrod, S. (1959). *Effects of early blindness: Performance of blind and sighted children on tactile and auditory tasks*: American Foundation for the Blind.
- Azevedo, F. A., Carvalho, L. R., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E., Leite, R. E., . . . Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, 513(5), 532-541.
- Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain mechanisms in sensory substitution*: Academic Press Inc.
- Bach-y-Rita, P. (1983). Tactile vision substitution: past and future. *Int J Neurosci*, 19(1-4), 29-36.
doi:10.3109/00207458309148643
- Bach-y-Rita, P. (2004). Tactile sensory substitution studies. *Ann N Y Acad Sci*, 1013, 83-91.
doi:10.1196/annals.1305.006
- Bach-y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F. A., White, B., & Scadden, L. (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature*, 221(5184), 963-964.
- Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., & Garcia-Lara, J. (1998). Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue: a technical note. *Journal of rehabilitation research and development*, 35, 427-430.
- Bach-y-Rita, P., & Kercel, S. W. (2003). Sensory substitution and the human—machine interface. *Trends in cognitive sciences*, 7(12), 541-546.

- Barker, A. T., Jalinous, R., & Freeston, I. L. (1985). Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *The Lancet*, 325(8437), 1106-1107.
- Barry, C., Lever, C., Hayman, R., Hartley, T., Burton, S., O'Keefe, J., . . . Burgess, N. (2006). The boundary vector cell model of place cell firing and spatial memory. *Reviews in the Neurosciences*, 17(1-2), 71.
- Bavelier, D., & Neville, H. J. (2002). Cross-modal plasticity: where and how? *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6), 443-452.
- Beaulieu-Lefebvre, M., Schneider, F. C., Kupers, R., & Ptito, M. (2011). Odor perception and odor awareness in congenital blindness. *Brain Research Bulletin*, 84(3), 206-209.
- Blajenkova, O., Motes, M. A., & Kozhevnikov, M. (2005). Individual differences in the representations of novel environments. *Journal of Environmental Psychology*, 25(1), 97-109.
- Blauert, J. (1997). *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*: MIT press.
- Bliss, T. V., & Lømo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *The Journal of physiology*, 232(2), 331-356.
- Bogen, J. E., Fisher, E., & Vogel, P. (1965). Cerebral commissurotomy: A second case report. *Jama*, 194(12), 1328-1329.
- Bregman, A. S., & Pinker, S. (1978). Auditory streaming and the building of timbre. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 32(1), 19.

- Brown, D., Macpherson, T., & Ward, J. (2011). Seeing with sound? exploring different characteristics of a visual-to-auditory sensory substitution device. *Perception, 40*(9), 1120-1135. doi:10.1068/p6952
- Büchel, C., Price, C., Frackowiak, R., & Friston, K. (1998). Different activation patterns in the visual cortex of late and congenitally blind subjects. *Brain: a journal of neurology, 121*(3), 409-419.
- Buchs, G., Maidenbaum, S., & Amedi, A. (2014). *Obstacle identification and avoidance using the 'EyeCane': a tactile sensory substitution device for blind individuals*. Paper presented at the International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron, 35*(4), 625-641.
- Burton, H., Diamond, J. B., & McDermott, K. B. (2003). Dissociating cortical regions activated by semantic and phonological tasks: a fMRI study in blind and sighted people. *Journal of neurophysiology, 90*(3), 1965-1982.
- Burton, H., Snyder, A., Diamond, J., & Raichle, M. (2002). Adaptive changes in early and late blind: a fMRI study of verb generation to heard nouns. *Journal of neurophysiology, 88*(6), 3359-3371.
- Cattaneo, Z., & Vecchi, T. (2008). Supramodality effects in visual and haptic spatial processes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 34*(3), 631.
- Chebat, D.-R., Chen, J.-K., Schneider, F., Ptito, A., Kupers, R., & Ptito, M. (2007). Alterations in right posterior hippocampus in early blind individuals. *Neuroreport, 18*(4), 329-333.

- Chebat, D.-R., Harrar, V., Kupers, R., Maidenbaum, S., Amedi, A., & Ptito, M. (2018). Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness. In *Mobility of Visually Impaired People* (pp. 167-200): Springer.
- Chebat, D.-R., Schneider, F. C., & Ptito, M. (2020a). Spatial Competence and Brain Plasticity in Congenital Blindness via Sensory Substitution Devices. *Frontiers in Neuroscience*, *14*(815). doi:10.3389/fnins.2020.00815
- Chebat, D. R., Maidenbaum, S., & Amedi, A. (2015). Navigation using sensory substitution in real and virtual mazes. *PLoS One*, *10*(6), e0126307. doi:10.1371/journal.pone.0126307
- Chebat, D. R., Rainville, C., Kupers, R., & Ptito, M. (2007). Tactile-'visual' acuity of the tongue in early blind individuals. *Neuroreport*, *18*(18), 1901-1904.
doi:10.1097/WNR.0b013e3282f2a63
- Chebat, D. R., Schneider, F. C., Kupers, R., & Ptito, M. (2011). Navigation with a sensory substitution device in congenitally blind individuals. *Neuroreport*, *22*(7), 342-347.
doi:10.1097/WNR.0b013e3283462def
- Chebat, D. R., Schneider, F. C., & Ptito, M. (2020b). Neural Networks Mediating Perceptual Learning in Congenital Blindness. *Sci Rep*, *10*(1), 495. doi:10.1038/s41598-019-57217-w
- Collignon, O., Lassonde, M., Lepore, F., Bastien, D., & Veraart, C. (2007). Functional cerebral reorganization for auditory spatial processing and auditory substitution of vision in early blind subjects. *Cereb Cortex*, *17*(2), 457-465. doi:10.1093/cercor/bhj162
- Collignon, O., Vandewalle, G., Voss, P., Albouy, G., Charbonneau, G., Lassonde, M., & Lepore, F. (2011). Functional specialization for auditory–spatial processing in the occipital cortex of congenitally blind humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(11), 4435-4440.

- Crowe, D. A., Chafee, M. V., Averbeck, B. B., & Georgopoulos, A. P. (2004a). Neural activity in primate parietal area 7a related to spatial analysis of visual mazes. *Cerebral Cortex*, *14*(1), 23-34.
- Crowe, D. A., Chafee, M. V., Averbeck, B. B., & Georgopoulos, A. P. (2004b). Participation of primary motor cortical neurons in a distributed network during maze solution: representation of spatial parameters and time-course comparison with parietal area 7a. *Experimental Brain Research*, *158*(1), 28-34.
- Devlin, A., Cross, J., Harkness, W., Chong, W., Harding, B., Vargha-Khadem, F., & Neville, B. (2003). Clinical outcomes of hemispherectomy for epilepsy in childhood and adolescence. *Brain*, *126*(3), 556-566.
- Doeller, C. F., Barry, C., & Burgess, N. (2010). Evidence for grid cells in a human memory network. *Nature*, *463*(7281), 657-661.
- Drager, U. C. (1978). Observations on monocular deprivation in mice. *Journal of neurophysiology*, *41*(1), 28-42.
- Duarte, I. C., Ferreira, C., Marques, J., & Castelo-Branco, M. (2014). Anterior/posterior competitive deactivation/activation dichotomy in the human hippocampus as revealed by a 3D navigation task. *PLoS One*, *9*(1), e86213.
- Duchowski, A. T. (2007). Eye tracking methodology. *Theory and practice*, *328*(614), 2-3.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, *270*(5234), 305-307.
- Epstein, R., Harris, A., Stanley, D., & Kanwisher, N. (1999). The parahippocampal place area: recognition, navigation, or encoding? *Neuron*, *23*(1), 115-125.

- Epstein, R., & Kanwisher, N. (1998). A cortical representation of the local visual environment. *Nature*, *392*(6676), 598-601.
- Epstein, R. A. (2008). Parahippocampal and retrosplenial contributions to human spatial navigation. *Trends in cognitive sciences*, *12*(10), 388-396.
- Epstein, R. A., Parker, W. E., & Feiler, A. M. (2007). Where am I now? Distinct roles for parahippocampal and retrosplenial cortices in place recognition. *Journal of Neuroscience*, *27*(23), 6141-6149.
- Fieger, A., Röder, B., Teder-Sälejärvi, W., Hillyard, S. A., & Neville, H. J. (2006). Auditory spatial tuning in late-onset blindness in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(2), 149-157.
- Fine, I., Wade, A. R., Brewer, A. A., May, M. G., Goodman, D. F., Boynton, G. M., . . . MacLeod, D. I. (2003). Long-term deprivation affects visual perception and cortex. *Nature neuroscience*, *6*(9), 915-916.
- Fortin, M., Voss, P., Lord, C., Lassonde, M., Pruessner, J., Saint-Amour, D., . . . Lepore, F. (2008). Wayfinding in the blind: larger hippocampal volume and supranormal spatial navigation. *Brain*, *131*(11), 2995-3005.
- Frasnelli, J., Collignon, O., Voss, P., & Lepore, F. (2011). Crossmodal plasticity in sensory loss. In *Progress in brain research* (Vol. 191, pp. 233-249): Elsevier.
- Frost, D. O., & Metin, C. (1985). Induction of functional retinal projections to the somatosensory system. *Nature*, *317*(6033), 162-164.
- Gagnon, L., Ismaili, A. R. A., Ptito, M., & Kupers, R. (2015). Superior orthonasal but not retronasal olfactory skills in congenital blindness. *PLoS One*, *10*(3).

- Gagnon, L., Kupers, R., & Ptito, M. (2013). Reduced taste sensitivity in congenital blindness. *Chemical senses, 38*(6), 509-517.
- Gagnon, L., Kupers, R., & Ptito, M. (2015). Neural correlates of taste perception in congenital blindness. *Neuropsychologia, 70*, 227-234.
- Gagnon, L., Schneider, F. C., Siebner, H. R., Paulson, O. B., Kupers, R., & Ptito, M. (2012). Activation of the hippocampal complex during tactile maze solving in congenitally blind subjects. *Neuropsychologia, 50*(7), 1663-1671.
- Gandemer, L., Parseihian, G., Kronland-Martinet, R., & Bourdin, C. (2017). Spatial cues provided by sound improve postural stabilization: evidence of a spatial auditory map? *Frontiers in Neuroscience, 11*, 357.
- Gori, M., Amadeo, M. B., & Campus, C. (2019). Spatial metric in blindness: behavioural and cortical processing. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*.
- Gougoux, F., Belin, P., Voss, P., Lepore, F., Lassonde, M., & Zatorre, R. J. (2009). Voice perception in blind persons: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuropsychologia, 47*(13), 2967-2974.
- Gougoux, F., Lepore, F., Lassonde, M., Voss, P., Zatorre, R. J., & Belin, P. (2004). Pitch discrimination in the early blind. *Nature, 430*(6997), 309-309.
- Gougoux, F., Zatorre, R. J., Lassonde, M., Voss, P., & Lepore, F. (2005). A functional neuroimaging study of sound localization: visual cortex activity predicts performance in early-blind individuals. *PLoS biology, 3*(2).
- Gregory, R. L. (2003). Seeing after blindness. *Nature neuroscience, 6*(9), 909-910.

- Gustafsson, B., & Wigstrom, H. (1986). Hippocampal long-lasting potentiation produced by pairing single volleys and brief conditioning tetani evoked in separate afferents. *Journal of Neuroscience*, 6(6), 1575-1582.
- Guterstam, A., Björnsdotter, M., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2015). Posterior cingulate cortex integrates the senses of self-location and body ownership. *Current Biology*, 25(11), 1416-1425.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.-B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436(7052), 801-806.
- Hamilton, R. H., Pascual-Leone, A., & Schlaug, G. (2004). Absolute pitch in blind musicians. *Neuroreport*, 15(5), 803-806.
- Harrar, V., Aubin, S., Chebat, D.-R., Kupers, R., & Ptito, M. (2018). The multisensory blind brain. In *Mobility of Visually Impaired People* (pp. 111-136): Springer.
- Hartcher-O'Brien, J., & Auvray, M. (2014). The process of distal attribution illuminated through studies of sensory substitution. *Multisensory research*, 27(5-6), 421-441.
- Harwerth, R. S., Smith, E. L., Duncan, G. C., Crawford, M., & Von Noorden, G. K. (1986). Multiple sensitive periods in the development of the primate visual system. *Science*, 232(4747), 235-238.
- Hassabis, D., Chu, C., Rees, G., Weiskopf, N., Molyneux, P. D., & Maguire, E. A. (2009). Decoding neuronal ensembles in the human hippocampus. *Current Biology*, 19(7), 546-554.
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151-176.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *The Journal of physiology*, 206(2), 419-436.

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1972). Laminar and columnar distribution of geniculo-cortical fibers in the macaque monkey. *Journal of Comparative Neurology*, 146(4), 421-450.

Hubel, D. H., Wiesel, T. N., LeVay, S., Barlow, H. B., & Gaze, R. M. (1977). Plasticity of ocular dominance columns in monkey striate cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 278(961), 377-409.

Hublet, C., & Demeurisse, G. (1992). Pure topographical disorientation due to a deep-seated lesion with cortical remote effects. *Cortex*, 28(1), 123-128.

Iachini, T., Ruggiero, G., & Ruotolo, F. (2014). Does blindness affect egocentric and allocentric frames of reference in small and large scale spaces? *Behavioural brain research*, 273, 73-81.

Ihsen, E., Troester, H., & Brambring, M. (2010). The role of sound in encouraging infants with congenital blindness to reach for objects. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 104(8), 478-488.

Jicol, C., Lloyd-Esenkaya, T., Proulx, M. J., Lange-Smith, S., Scheller, M., O'Neill, E., & Petrini, K. (2020). Efficiency of sensory substitution devices alone and in combination with self-motion for spatial navigation in sighted and visually impaired. *Frontiers in psychology*, 11.

Johansson, B. B., & Belichenko, P. V. (2002). Neuronal plasticity and dendritic spines: effect of environmental enrichment on intact and postischemic rat brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 22(1), 89-96.

Johnson, L. A., & Higgins, C. M. (2006). A navigation aid for the blind using tactile-visual sensory substitution. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 1, 6289-6292.

doi:10.1109/IEMBS.2006.259473

Kaczmarek, K., Bach-y-Rita, P., Tompkins, W. J., & Webster, J. G. (1985). A tactile vision-substitution system for the blind: computer-controlled partial image sequencing. *IEEE Trans Biomed Eng*, 32(8), 602-608. doi:10.1109/TBME.1985.325599

Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., & Bach-y-Rita, P. (1994). *Electrotactile haptic display on the fingertips: Preliminary results*. Paper presented at the Proceedings of 16th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

Kacznaarek, K. A., & Bach-Y-Rita, P. (1995). Tactile displays. *Virtual environments and advanced interface design*, 349.

Kato, Y., & Takeuchi, Y. (2003). Individual differences in wayfinding strategies. *Journal of Environmental Psychology*, 23(2), 171-188.

Kellogg, W. N. (1962). Sonar system of the blind. *Science*, 137(3528), 399-404.

Kennard, M. A. (1942). Cortical reorganization of motor function: studies on series of monkeys of various ages from infancy to maturity. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 48(2), 227-240.

King, V. R., & Corwin, J. V. (1993). Comparisons of hemi-inattention produced by unilateral lesions of the posterior parietal cortex or medial agranular prefrontal cortex in rats: neglect, extinction, and the role of stimulus distance. *Behavioural brain research*, 54(2), 117-131.

Klatzky, R. L. (1998). *Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections*. Paper presented at the Spatial cognition.

- Krynauw, R. A. (1950). Infantile hemiplegia treated by removing one cerebral hemisphere. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 13(4), 243.
- Kupers, R., Beaulieu-Lefebvre, M., Schneider, F., Kassuba, T., Paulson, O., Siebner, H., & Ptito, M. (2011). Neural correlates of olfactory processing in congenital blindness. *Neuropsychologia*, 49(7), 2037-2044.
- Kupers, R., Chebat, D. R., Madsen, K. H., Paulson, O. B., & Ptito, M. (2010). Neural correlates of virtual route recognition in congenital blindness. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 107(28), 12716-12721. doi:10.1073/pnas.1006199107
- Kupers, R., Pappens, M., de Noordhout, A. M., Schoenen, J., Ptito, M., & Fumal, A. (2007). rTMS of the occipital cortex abolishes Braille reading and repetition priming in blind subjects. *Neurology*, 68(9), 691-693.
- Kupers, R., & Ptito, M. (2004). "Seeing" through the tongue: cross-modal plasticity in the congenitally blind. Paper presented at the International Congress Series.
- Kupers, R., & Ptito, M. (2014). Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 41, 36-52.
- Kyle, C. T., Stokes, J. D., Lieberman, J. S., Hassan, A. S., & Ekstrom, A. D. (2015). Successful retrieval of competing spatial environments in humans involves hippocampal pattern separation mechanisms. *Elife*, 4, e10499.
- Lee, V. K., Nau, A. C., Laymon, C., Chan, K. C., Rosario, B. L., & Fisher, C. (2014). Successful tactile based visual sensory substitution use functions independently of visual pathway integrity. *Front Hum Neurosci*, 8, 291. doi:10.3389/fnhum.2014.00291
- Lenck-Santini, P., Hok, V., Save, E., Banquet, P., Gaussier, P., Müller, R., & Poucet, B. (2004). Spatial navigation and hippocampal place cell firing: the problem of goal encoding.

- Lessard, N., Paré, M., Lepore, F., & Lassonde, M. (1998). Early-blind human subjects localize sound sources better than sighted subjects. *Nature*, *395*(6699), 278-280.
- Lewald, J. (2002). Vertical sound localization in blind humans. *Neuropsychologia*, *40*(12), 1868-1872.
- Liu, Y., Stiles, N. R., & Meister, M. (2018). Augmented reality powers a cognitive assistant for the blind. *Elife*, *7*. doi:10.7554/eLife.37841
- Long, R. G., & Hill, E. (1997). Establishing and maintaining orientation for mobility. *Foundations of orientation and mobility*, *1*.
- Longo, M. R., Betti, V., Aglioti, S. M., & Haggard, P. (2009). Visually induced analgesia: seeing the body reduces pain. *Journal of Neuroscience*, *29*(39), 12125-12130.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Giudice, N. A., Manduchi, R., & Kurniawan, S. (2012). Sensory substitution of vision: importance of perceptual and cognitive processing. *Assistive technology for blindness and low vision*, 162-191.
- Lovell, K. (1959). A follow-up study of some aspects of the work of Piaget and Inhelder on the child's conception of space. *British Journal of Educational Psychology*, *29*(2), 104-117.
- Lynch, M. A. (2004). Long-term potentiation and memory. *Physiological reviews*, *84*(1), 87-136.
- Maguire, E. (2001). The retrosplenial contribution to human navigation: a review of lesion and neuroimaging findings. *Scandinavian Journal of Psychology*, *42*(3), 225-238.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(8), 4398-4403.

Maguire, E. A., Nannery, R., & Spiers, H. J. (2006). Navigation around London by a taxi driver with bilateral hippocampal lesions. *Brain*, *129*(11), 2894-2907.

Maidenbaum, S., Hanassy, S., Abboud, S., Buchs, G., Chebat, D. R., Levy-Tzedek, S., & Amedi, A. (2014). The "EyeCane", a new electronic travel aid for the blind: Technology, behavior & swift learning. *Restor Neurol Neurosci*, *32*(6), 813-824. doi:10.3233/RNN-130351

Matteau, I., Kupers, R., Ricciardi, E., Pietrini, P., & Ptito, M. (2010). Beyond visual, aural and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals. *Brain Res Bull*, *82*(5-6), 264-270. doi:10.1016/j.brainresbull.2010.05.001

McFadyen, B. J., Bouyer, L., Bent, L. R., & Inglis, J. T. (2007). Visual-vestibular influences on locomotor adjustments for stepping over an obstacle. *Experimental Brain Research*, *179*(2), 235-243.

McNaughton, B. L., Barnes, C. A., Gerrard, J. L., Gothard, K., Jung, M. W., Knierim, J. J., . . . Suster, M. (1996). Deciphering the hippocampal polyglot: the hippocampus as a path integration system. *Journal of Experimental Biology*, *199*(1), 173-185.

McNaughton, B. L., Battaglia, F. P., Jensen, O., Moser, E. I., & Moser, M.-B. (2006). Path integration and the neural basis of the 'cognitive map'. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*(8), 663-678.

Meijer, P. B. (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE transactions on biomedical engineering*, *39*(2), 112-121.

Mellor, C. M. (2006). *Louis Braille: A touch of genius*: National Braille Press.

- Merabet, L. B., Hamilton, R., Schlaug, G., Swisher, J. D., Kiriakopoulos, E. T., Pitskel, N. B., . . . Pascual-Leone, A. (2008). Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch. *PLoS One*, *3*(8), e3046.
- Métin, C., & Frost, D. O. (1989). Visual responses of neurons in somatosensory cortex of hamsters with experimentally induced retinal projections to somatosensory thalamus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *86*(1), 357-361.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in neurosciences*, *6*, 414-417.
- Miyazaki, K. i. (1988). Musical pitch identification by absolute pitch possessors. *Perception & psychophysics*, *44*(6), 501-512.
- Montello, D. R. (2005). *Navigation*: Cambridge University Press.
- Montello, D. R., & Sas, C. (2006). Human factors of wayfinding in navigation.
- Moser, E. I., Kropff, E., & Moser, M.-B. (2008). Place cells, grid cells, and the brain's spatial representation system. *Annu. Rev. Neurosci.*, *31*, 69-89.
- Muchnik, C., Efrati, M., Nemeth, E., Malin, M., & Hildesheimer, M. (1991). Central auditory skills in blind and sighted subjects. *Scandinavian audiology*, *20*(1), 19-23.
- Müller, F., Niso, G., Samiee, S., Ptito, M., Baillet, S., & Kupers, R. (2019). A thalamocortical pathway for fast rerouting of tactile information to occipital cortex in congenital blindness. *Nature communications*, *10*(1), 1-9.
- Muller, R. U., & Kubie, J. L. (1987). The effects of changes in the environment on the spatial firing of hippocampal complex-spike cells. *Journal of Neuroscience*, *7*(7), 1951-1968.

- Murphy, C., & Cain, W. S. (1986). Odor identification: The blind are better. *Physiology & Behavior, 37*(1), 177-180.
- Nau, A., Bach, M., & Fisher, C. (2013). Clinical tests of ultra-low vision used to evaluate rudimentary visual perceptions enabled by the BrainPort vision device. *Translational vision science & technology, 2*(3), 1-1.
- Nau, A. C., Pintar, C., Arnoldussen, A., & Fisher, C. (2015). Acquisition of visual perception in blind adults using the BrainPort artificial vision device. *American Journal of Occupational Therapy, 69*(1), 6901290010p6901290011-6901290010p6901290018.
- Nau, A. C., Pintar, C., Fisher, C., Jeong, J.-H., & Jeong, K. (2014). A standardized obstacle course for assessment of visual function in ultra low vision and artificial vision. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*(84), e51205.
- Niemeyer, W., & Starlinger, I. (1981). Do the blind hear better? Investigations on auditory processing in congenital or early acquired blindness II. Central functions. *Audiology, 20*(6), 510-515.
- Nitz, D. (2009). Parietal cortex, navigation, and the construction of arbitrary reference frames for spatial information. *Neurobiology of learning and memory, 91*(2), 179-185.
- Nitz, D. A. (2006). Tracking route progression in the posterior parietal cortex. *Neuron, 49*(5), 747-756.
- Norman, J. F., Crabtree, C. E., Clayton, A. M., & Norman, H. F. (2005). The perception of distances and spatial relationships in natural outdoor environments. *Perception, 34*(11), 1315-1324.
- Norris, M. (1957). *Blindness in children*: University of Chicago Press.

- O'Keefe, J. (1976). Place units in the hippocampus of the freely moving rat. *Experimental neurology*, 51(1), 78-109.
- O'Keefe, J., & Speakman, A. (1987). Single unit activity in the rat hippocampus during a spatial memory task. *Experimental Brain Research*, 68(1), 1-27.
- Olausson, H., Ha, B., Duncan, G. H., Morin, C., Ptito, A., Ptito, M., . . . Bushnell, M. C. (2001). Cortical activation by tactile and painful stimuli in hemispherectomized patients. *Brain*, 124(5), 916-927.
- Pamir, Z., Canoluk, M. U., Jung, J.-H., & Peli, E. (2020). Poor resolution at the back of the tongue is the bottleneck for spatial pattern recognition. *Scientific Reports*, 10(1), 1-13.
- Pasqualotto, A., Spiller, M. J., Jansari, A. S., & Proulx, M. J. (2013). Visual experience facilitates allocentric spatial representation. *Behavioural brain research*, 236, 175-179.
- Passini, R. (1981). Wayfinding: A conceptual framework. *Urban Ecology*, 5(1), 17-31.
- Passini, R., Proulx, G., & Rainville, C. (1990). The spatio-cognitive abilities of the visually impaired population. *Environment and Behavior*, 22(1), 91-118.
- Pearce, J. M., Roberts, A. D., & Good, M. (1998). Hippocampal lesions disrupt navigation based on cognitive maps but not heading vectors. *Nature*, 396(6706), 75-77.
- Piaget, J. (2003). Part I: Cognitive Development in Children--Piaget Development and Learning. *Journal of research in science teaching*, 40.
- Proulx, M. J., Brown, D. J., Pasqualotto, A., & Meijer, P. (2014). Multisensory perceptual learning and sensory substitution. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 41, 16-25.

- Proulx, M. J., Gwinnutt, J., Dell'Erba, S., Levy-Tzedek, S., de Sousa, A. A., & Brown, D. J. (2016). Other ways of seeing: From behavior to neural mechanisms in the online "visual" control of action with sensory substitution. *Restorative neurology and neuroscience*, *34*(1), 29-44.
- Proulx, M. J., & Harder, A. (2008). Sensory substitution. Visual-to-auditory sensory substitution devices for the blind. *Dutch Journal of Ergonomics/Tijdschrift voor Ergonomie*, *33*, 20-22.
- Proulx, M. J., Ptito, M., & Amedi, A. (2014). Multisensory integration, sensory substitution and visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev*, *41*, 1-2.
doi:10.1016/j.neubiorev.2014.03.004
- Proulx, M. J., Stoerig, P., Ludowig, E., & Knoll, I. (2008). Seeing 'where' through the ears: effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution. *PLoS One*, *3*(3), e1840. doi:10.1371/journal.pone.0001840
- Ptito, M., Fumal, A., De Noordhout, A. M., Schoenen, J., Gjedde, A., & Kupers, R. (2008). TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind Braille readers. *Experimental Brain Research*, *184*(2), 193-200.
- Ptito, M., Giguère, J.-F., Boire, D., Frost, D., & Casanova, C. (2001). When the auditory cortex turns visual. In *Progress in brain research* (Vol. 134, pp. 447-458): Elsevier.
- Ptito, M., & Kupers, R. (2005). Cross-modal plasticity in early blindness. *Journal of integrative neuroscience*, *4*(04), 479-488.
- Ptito, M., Matteau, I., Gjedde, A., & Kupers, R. (2009). Recruitment of the middle temporal area by tactile motion in congenital blindness. *Neuroreport*, *20*(6), 543-547.

- Ptito, M., Moesgaard, S. M., Gjedde, A., & Kupers, R. (2005). Cross-modal plasticity revealed by electrotactile stimulation of the tongue in the congenitally blind. *Brain*, *128*(Pt 3), 606-614. doi:10.1093/brain/awh380
- Ptito, M., Schneider, F. C., Paulson, O. B., & Kupers, R. (2008). Alterations of the visual pathways in congenital blindness. *Experimental Brain Research*, *187*(1), 41-49.
- Quirk, G. J., Muller, R. U., & Kubie, J. L. (1990). The firing of hippocampal place cells in the dark depends on the rat's recent experience. *Journal of Neuroscience*, *10*(6), 2008-2017.
- Ranck Jr, J. (1984). *Head direction cells in the deep layer of dorsal presubiculum in freely moving rats*. Paper presented at the Society of Neuroscience Abstract.
- Redish, A. D., Battaglia, F. P., Chawla, M. K., Ekstrom, A. D., Gerrard, J. L., Lipa, P., . . .
McNaughton, B. L. (2001). Independence of firing correlates of anatomically proximate hippocampal pyramidal cells. *Journal of Neuroscience*, *21*(5), RC134-RC134.
- Reynolds, Z., & Glenney, B. (2009). Interactive training for sensory substitution devices. *Proceedings of AP-CAP*, 131-134.
- Riazi, A., Riazi, F., Yoosfi, R., & Bahmeei, F. (2016). Outdoor difficulties experienced by a group of visually impaired Iranian people. *Journal of current ophthalmology*, *28*(2), 85-90.
- Rieser, J. J., Hill, E. W., Talor, C. R., Bradfield, A., & Rosen, S. (1992). Visual experience, visual field size, and the development of nonvisual sensitivity to the spatial structure of outdoor neighborhoods explored by walking. *Journal of Experimental Psychology: General*, *121*(2), 210.
- Röder, B., Stock, O., Bien, S., Neville, H., & Rösler, F. (2002). Speech processing activates visual cortex in congenitally blind humans. *European Journal of Neuroscience*, *16*(5), 930-936.

- Röder, B., Teder-SaĖlejaĖrvi, W., Sterr, A., Rösler, F., Hillyard, S. A., & Neville, H. J. (1999). Improved auditory spatial tuning in blind humans. *Nature*, *400*(6740), 162-166.
- Rombaux, P., Huart, C., De Volder, A. G., Cuevas, I., Renier, L., Duprez, T., & Grandin, C. (2010). Increased olfactory bulb volume and olfactory function in early blind subjects. *Neuroreport*, *21*(17), 1069-1073.
- Rondi-Reig, L., Paradis, A.-L., Lefort, J. M., Babayan, B. M., & Tobin, C. (2014). How the cerebellum may monitor sensory information for spatial representation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *8*, 205.
- Rosen, S., & Crawford, J. (2010). Teaching orientation and mobility to learners with visual, physical, and health impairments. *Foundations of Orientation and Mobility: Instructional strategies and practical applications*, *3*, 564-623.
- Ross, D. A., Olson, I. R., & Gore, J. C. (2003). Cortical plasticity in an early blind musician: an fMRI study. *Magnetic resonance imaging*, *21*(7), 821-828.
- Ruggiero, G., Ruotolo, F., & Iachini, T. (2012). Egocentric/allocentric and coordinate/categorical haptic encoding in blind people. *Cognitive processing*, *13*(1), 313-317.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Deiber, M.-P., Ibanez, V., & Hallett, M. (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain: a journal of neurology*, *121*(7), 1213-1229.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J., Ibañez, V., Deiber, M.-P., Dold, G., & Hallett, M. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, *380*(6574), 526-528.
- Sampaio, E., Maris, S., & Bach-y-Rita, P. (2001). Brain plasticity: 'visual' acuity of blind persons via the tongue. *Brain research*, *908*(2), 204-207.

- Samsonovich, A., & McNaughton, B. L. (1997). Path integration and cognitive mapping in a continuous attractor neural network model. *Journal of Neuroscience*, *17*(15), 5900-5920.
- Sargolini, F., Fyhn, M., Hafting, T., McNaughton, B. L., Witter, M. P., Moser, M.-B., & Moser, E. I. (2006). Conjunctive representation of position, direction, and velocity in entorhinal cortex. *Science*, *312*(5774), 758-762.
- Saucier, D., Bowman, M., & Elias, L. (2003). Sex differences in the effect of articulatory or spatial dual-task interference during navigation. *Brain and Cognition*, *53*(2), 346-350.
- Save, E., Guazzelli, A., & Poucet, B. (2001). Dissociation of the effects of bilateral lesions of the dorsal hippocampus and parietal cortex on path integration in the rat. *Behavioral neuroscience*, *115*(6), 1212.
- Schinazi, V. R., Thrash, T., & Chebat, D. R. (2016). Spatial navigation by congenitally blind individuals. *WIREs Cognitive Science*.
- Schwesig, R., Goldich, Y., Hahn, A., Müller, A., Kohen-Raz, R., Kluttig, A., & Morad, Y. (2011). Postural control in subjects with visual impairment. *European journal of ophthalmology*, *21*(3), 303-309.
- Shemyakin, F. (1962). Orientation in space. *Psychological Science in the USSR*, *1*, 186-255.
- Shine, J. P., Valdés-Herrera, J. P., Hegarty, M., & Wolbers, T. (2016). The human retrosplenial cortex and thalamus code head direction in a global reference frame. *Journal of Neuroscience*, *36*(24), 6371-6381.
- Siegle, J. H., & Warren, W. H. (2010). Distal attribution and distance perception in sensory substitution. *Perception*, *39*(2), 208-223.

- Simon, H. J., Divenyi, P. L., & Lotze, A. (2002). Lateralization of narrow-band noise by blind and sighted listeners. *Perception*, *31*(7), 855-873.
- Skaggs, W. E., & McNaughton, B. L. (1998). Spatial firing properties of hippocampal CA1 populations in an environment containing two visually identical regions. *Journal of Neuroscience*, *18*(20), 8455-8466.
- Slimani, H., Danti, S., Ptito, M., & Kupers, R. (2014). Pain perception is increased in congenital but not late onset blindness. *PLoS One*, *9*(9), e107281.
- Slimani, H., Danti, S., Ricciardi, E., Pietrini, P., Ptito, M., & Kupers, R. (2013). Hypersensitivity to pain in congenital blindness. *PAIN*[®], *154*(10), 1973-1978.
- Slimani, H., Plaghki, L., Ptito, M., & Kupers, R. (2016). Pain hypersensitivity in congenital blindness is associated with faster central processing of C-fibre input. *European Journal of Pain*, *20*(9), 1519-1529.
- Spiers, H. J., & Maguire, E. A. (2006). Thoughts, behaviour, and brain dynamics during navigation in the real world. *Neuroimage*, *31*(4), 1826-1840.
- Starlinger, I., & Niemeyer, W. (1981). Do the blind hear better? Investigations on auditory processing in congenital or early acquired blindness I. Peripheral functions. *Audiology*, *20*(6), 503-509.
- Sterr, A., Müller, M. M., Elbert, T., Rockstroh, B., Pantev, C., & Taub, E. (1998). Perceptual correlates of changes in cortical representation of fingers in blind multifinger Braille readers. *Journal of Neuroscience*, *18*(11), 4417-4423.
- Strelow, E. R., & Brabyn, J. A. (1982). Locomotion of the blind controlled by natural sound cues. *Perception*, *11*(6), 635-640.

Striem-Amit, E., & Amedi, A. (2014). Visual cortex extrastriate body-selective area activation in congenitally blind people "seeing" by using sounds. *Curr Biol*, 24(6), 687-692.
doi:10.1016/j.cub.2014.02.010

Striem-Amit, E., Cohen, L., Dehaene, S., & Amedi, A. (2012). Reading with sounds: sensory substitution selectively activates the visual word form area in the blind. *Neuron*, 76(3), 640-652. doi:10.1016/j.neuron.2012.08.026

Striem-Amit, E., Guendelman, M., & Amedi, A. (2012). 'Visual' acuity of the congenitally blind using visual-to-auditory sensory substitution. *PLoS One*, 7(3), e33136.
doi:10.1371/journal.pone.0033136

Stronks, H. C., Nau, A. C., Ibbotson, M. R., & Barnes, N. (2015). The role of visual deprivation and experience on the performance of sensory substitution devices. *Brain Res*, 1624, 140-152. doi:10.1016/j.brainres.2015.06.033

Supa, M., Cotzin, M., & Dallenbach, K. M. (1944). "Facial vision": the perception of obstacles by the blind. *The American Journal of Psychology*, 57(2), 133-183.

Suterko, S. (1967). *Long cane training: Its advantages and problems*. Paper presented at the Proceedings of the Conference for Mobility Trainers and Technologists.

Taube, J. S. (2007). The head direction signal: origins and sensory-motor integration. *Annu. Rev. Neurosci.*, 30, 181-207.

Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. (1990a). Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. I. Description and quantitative analysis. *Journal of Neuroscience*, 10(2), 420-435.

- Taube, J. S., Muller, R. U., & Ranck, J. B. (1990b). Head-direction cells recorded from the postsubiculum in freely moving rats. II. Effects of environmental manipulations. *Journal of Neuroscience*, *10*(2), 436-447.
- Tosoni, A., Galati, G., Romani, G. L., & Corbetta, M. (2008). Sensory-motor mechanisms in human parietal cortex underlie arbitrary visual decisions. *Nature neuroscience*, *11*(12), 1446-1453.
- Van Boven, R. W., Hamilton, R. H., Kauffman, T., Keenan, J. P., & Pascual-Leone, A. (2000). Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology*, *54*(12), 2230-2236.
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., . . . Samii, A. (2016). Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset. *Neuroimage*, *126*, 106-119.
- Vincent, M., Tang, H., Zhu, Z., & Ro, T. (2014). Discrimination of Shapes and Line Orientations on the Tongue. *Journal of Vision*, *14*(10), 1094-1094.
- Von Senden, M. (1960). Space and sight: the perception of space and shape in the congenitally blind before and after operation.
- Voss, P., Gougoux, F., Zatorre, R. J., Lassonde, M., & Lepore, F. (2008). Differential occipital responses in early-and late-blind individuals during a sound-source discrimination task. *Neuroimage*, *40*(2), 746-758.
- Voss, P., Lassonde, M., Gougoux, F., Fortin, M., Guillemot, J.-P., & Lepore, F. (2004). Early-and late-onset blind individuals show supra-normal auditory abilities in far-space. *Current Biology*, *14*(19), 1734-1738.
- Voss, P., & Zatorre, R. J. (2012). Occipital cortical thickness predicts performance on pitch and musical tasks in blind individuals. *Cerebral Cortex*, *22*(11), 2455-2465.

- Ward, J., & Meijer, P. (2010). Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Consciousness and cognition*, 19(1), 492-500.
- Weniger, G., Ruhleder, M., Wolf, S., Lange, C., & Irle, E. (2009). Egocentric memory impaired and allocentric memory intact as assessed by virtual reality in subjects with unilateral parietal cortex lesions. *Neuropsychologia*, 47(1), 59-69.
- White, B. W., Saunders, F. A., Scadden, L., Bach-Y-Rita, P., & Collins, C. C. (1970). Seeing with the skin. *Perception & psychophysics*, 7(1), 23-27.
- Wiener, W. R., Welsh, R. L., & Blasch, B. B. (2010). *Foundations of orientation and mobility* (Vol. 1): American Foundation for the Blind.
- Williams, M. D., Ray, C. T., Griffith, J., & De l'Aune, W. (2011). The use of a tactile-vision sensory substitution system as an augmentative tool for individuals with visual impairments. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 105(1), 45-50.
- Wills, T. J., Cacucci, F., Burgess, N., & O'Keefe, J. (2010). Development of the hippocampal cognitive map in preweanling rats. *Science*, 328(5985), 1573-1576.
- Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in cognitive sciences*, 14(3), 138-146.
- Wong, M., Gnanakumaran, V., & Goldreich, D. (2011). Tactile spatial acuity enhancement in blindness: evidence for experience-dependent mechanisms. *Journal of Neuroscience*, 31(19), 7028-7037.
- Woodworth, R., & Schlosberg, H. (1938). Reaction time. *Experimental psychology*, 298-339.
- Zubek, J. P., Flye, J., & Aftanas, M. (1964). Cutaneous Sensitivity after Prolonged Visual Deprivation. *Science*, 144(3626), 1591-1593.

Zwiers, M., Van Opstal, A., & Cruysberg, J. (2001). A spatial hearing deficit in early-blind humans.
Journal of Neuroscience, 21(9), RC142-RC142.

