



HAL
open science

Etude sur l'apport du LIDAR pour faciliter les déplacements locomoteurs des personnes non-voyantes

Aya Dernayka

► **To cite this version:**

Aya Dernayka. Etude sur l'apport du LIDAR pour faciliter les déplacements locomoteurs des personnes non-voyantes. Psychologie. Université Paris-Saclay, 2023. Français. NNT : 2023UPASW001 . tel-04074572

HAL Id: tel-04074572

<https://theses.hal.science/tel-04074572>

Submitted on 19 Apr 2023

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

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

Etude sur l'apport du LIDAR pour faciliter les déplacements locomoteurs des personnes non-voyantes

Study of the contribution of LIDAR for blind people to facilitate their mobility

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°566 : Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain
(SSMMH)

Spécialité de doctorat : Sciences du sport et du mouvement humain

Graduate School : Sport, mouvement et facteurs humains

Référent : Faculté des Sciences du Sport

Thèse préparée dans les unités de recherche CIAMS (Université Paris Saclay) et le
Laboratoire Aimé Cotton (Université Paris Saclay, CNRS), sous la direction de
Michel-Ange AMORIM, professeur des universités, la co-direction de **René Farcy**,
professeur des universités

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 06 février 2023, par

Aya DERNAYKA

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Sylvie MARTIN-VERNAZZA Professeure des universités, Univ. Paris-Nanterre	Présidente
Pierre DENISE Professeur des universités, Univ. Caen	Rapporteur & Examineur
Valérie GYSELINCK Professeure des universités, Univ. Gustave Eiffel	Rapporteuse & Examinatrice
Marion LUYAT Professeure des universités, Univ. De Lille	Examinatrice

Titre : Etude sur l'apport du LIDAR pour faciliter les déplacements locomoteurs des personnes non-voyantes

Mots clés : Non-voyants, canne électronique, Tom Pouce 3, canne blanche, régulation du mouvement, approche écologique et cognitive

Résumé : la canne électronique Tom Pouce III est un outil de substitution de la vue destiné à fluidifier le déplacement de la personne non-voyante en lui permettant de trouver à distance le passage dans un environnement encombré, et à améliorer l'autonomie et la sécurité de ses déplacements quotidiens. L'objectif de ce travail est d'observer et de comprendre le comportement des utilisateurs dans des situations maîtrisées et reproductibles proches de celles de la vie courante. Pour cela cinq protocoles expérimentaux ont été mis en œuvre chez 12 non-voyants ayant entre 2 et 20 ans d'utilisation quotidienne du Tom Pouce III (en comparant la performance à la canne électronique et la canne blanche simple), ainsi qu'avec 12 sujets voyants

voyants utilisant leur vue : pointage locomoteur, choix d'un passage parmi plusieurs, passabilité d'une ouverture, navigation dans un espace encombré, navigation sur une longue durée dans un espace moyennement encombré.

En plus de l'analyse des résultats des protocoles on discute également des différents processus cognitifs et variables écologique en jeu dans le contrôle locomoteur des sujets non-voyants. Ceci va permettre d'expliquer les limitations et erreurs dans la régulation du mouvement provenant soit de l'humain, soit du matériel. On conclut par des propositions d'orientations pour améliorer le contrôle locomoteur des utilisateurs de cannes électronique.

Title : Study of the contribution of LIDAR for blind people to facilitate their mobility

Keywords : Blind people, electronic white cane, Tom Pouce 3, white cane, movement regulation, ecological and cognitive approach

Abstract: The electronic cane « Tom Pouce III » is a vision substitution tool intended to make the movement of the blind user more fluid, helping him to find his way from a distance in a cluttered environment, and also to improve the autonomy and safety of his/her daily movements. The objective of this work is to observe and understand the behavior of users in controlled and reproducible situations close to those of everyday life. For this purpose, five experimental protocols were tested among 12 blind participants with between 2 and 20 years of daily use of Tom Pouce III (comparing the performance with the electronic cane and the simple white cane) as well as among 12 sighted subjects using their sight : locomotor

pointing, choice of one passage among several, passability of an opening, navigation in a congested space, navigation over a long period in a moderately congested space. In addition to analyzing the results of the protocols, we also discuss the different cognitive processes and ecological variables involved in the locomotor control of blind subjects. This will allow to explain the limitations and errors in the regulation of the movement coming either from the human or from the tool. We conclude by proposing directions to improve the locomotor control for users of electronic canes.

Table des matières

I. Introduction générale	7
II. Etat de l'art	12
II.1. La représentation de l'espace chez les personnes non-voyantes	13
II.1.1. Définitions de la déficience visuelle	13
II.1.2. Les conséquences de la déficience visuelle	14
II.1.3. La prise en charge en rééducation	16
II.1.4. Les concepts théoriques pour comprendre la mobilité des personnes malvoyantes	17
II.1.4.1 Les liens perception-action	17
II.1.4.2. Le rôle de l'expérience visuelle dans la représentation de l'espace	21
II.1.4.3 La mise à jour de la représentation spatiale lors du déplacement	24
II.1.4.4. Rôle du vécu dans la représentation spatiale	26
Résumé de la section II.1.	29
II.2. Les outils de substitution sensorielle au service de la locomotion	30
II.2.1 La substitution sensorielle	30
II.2.1.1 Analyse de dispositifs de substitution sensorielle couramment utilisés	30
II.2.1.2 Exemples de prototypes de laboratoires	30
II.2.2. La locomotion à la canne blanche	33
II.2.2.1 La rééducation en locomotion : motivation et fonctionnalité	33
II.2.2.2 La canne blanche et son utilisation en locomotion	35
II.2.3. Les cannes électroniques et leurs tests de validation	37
II. 2.3.1 Exemples non exhaustifs de modèles commercialisés	37
II. 2.3.2 Évaluation de performances de dispositifs	38
II. 2.3.3. La canne électronique « Tom Pouce III » : Description et utilisation	45
Résumé de la section II.2	50
II.3. La perception de la passabilité d'une ouverture	51
II.3.1. Perception de la passabilité en mode visuel	51
II.3.2. Perception de la passabilité en mode non visuel	53
Résumé de la section II.3.	54
III. Problématique et hypothèses	55
IV. Contributions expérimentales	62

IV.1 Localisation d'objets dans l'environnement	63
IV.1.1. Détektivité de la canne électronique	63
1.1.1. Participants	63
1.1.2. Matériel et Méthode	64
1.1.3. Résultats et Discussion	66
IV.1.2. Pointage locomoteur vers un objet distant	69
1.2.1 Participants	69
1.2.2. Matériel et Méthode	71
1.2.3. Résultats et Discussion	73
IV.1.3. Choix de passage	83
1.3.1. Participants	84
1.3.2. Matériel et Méthode	84
1.3.3. Résultats et Discussion	86
IV.2. Perception de la passabilité au service de la locomotion	90
IV.2.1. Perception de la passabilité d'une ouverture	90
2.1.1. Participants	90
2.1.2. Matériel et Méthode	90
2.1.3. Résultats et Discussion	92
IV.2.2. Navigation simple au milieu de nombreux obstacles	96
2.2.1. Participants	96
2.2.2. Matériel et Méthode	96
2.2.3. Résultats et Discussion	98
IV.2.3. Navigation répétée au milieu de nombreux obstacles	101
2.3.1. Participants	101
2.3.2. Matériel et Méthode	102
2.3.3. Résultats et Discussion	102
IV.3. Analyse synthétique des performances des non-voyants avec TP3 sur l'ensemble des expériences	106
IV.3.1. Les variables retenues	106
IV.3.2. Analyse factorielle exploratoire	107
IV.3.3. Analyse de Clustering des performances moyennes	110
V. Discussion générale	112
V.1. Introduction	113
V.2. Description et interprétation du flux d'échantillonnage spatio-temporel fourni par l'appareil	117
V.3. Interprétation des observations incluant l'ensemble des protocoles	133

V.3.1 Interprétation conjointe des protocoles	133
V.3.2. Interprétation de l'ACP	136
V.3.3. Schéma de synthèse	138
V.4. Conclusion : limites et perspectives	139
VI. Bibliographie	144
VI. Annexes	154
Annexe 1: Méthode de mesure : pointage locomoteur vers un objet distant	154
Annexe 2 : Questionnaire du protocole expérimental pointage locomoteur	157
Annexe 3 : Questionnaire du protocole expérimental Choix de passage	158
Annexe 4 : Questionnaire du protocole expérimental perception de la passabilité	159
Annexe 5 : Questionnaire du protocole expérimental navigation simple	160
Annexe 6 : Questionnaire du protocole expérimental navigation répétée	161

I. Introduction générale

La déficience visuelle est traitée par plusieurs corps de métiers :

- Les ophtalmologues s'attachent à restaurer la fonction visuelle par des opérations chirurgicales de complexités diverses, de l'opération de la cataracte à taux de succès très élevé et restaurant quasi parfaitement la vue, à des opérations très complexes expérimentales n'ayant pas encore de résultats fonctionnels comme les implants rétiniens.
- Les rééducateurs orthoptistes apprennent à utiliser de la manière la plus efficace possible le reste visuel pour des opérations de lecture.
- Les rééducateurs Avéjistes (Activité Vie Journalière) et Instructeurs de locomotion apprennent aux déficients visuels à utiliser des stratégies non visuelles pour pouvoir faire autrement des actions de la vie quotidienne de manière autonome : faire la cuisine, ses courses, se déplacer seul dans la rue.
- Les éducateurs de chiens-guides forment un animal à l'assistance de la personne déficiente visuelle dans ses déplacements
- Des chercheurs du domaine des neurosciences et de la physique se consacrent à mettre au point des dispositifs technologiques pouvant aider soit les ophtalmologues, soit les rééducateurs dans leur pratique.

Nous nous inscrivons dans cette dernière catégorie. Cette thèse est au service de l'objectif suivant : améliorer l'efficacité d'une aide technologique pour faciliter les déplacements autonomes des déficients visuels, sous la forme d'une canne électronique, outil qui est proposé par des rééducateurs instructeurs de locomotion.

Les sens sont obligatoirement utiles, tout développement de facultés sensorielles est lié à un usage vital de ces dernières. En effet les taupes n'ayant pas besoin de la vision, qui serait de peu d'utilité dans leurs galeries, l'ont très peu développée. Les aigles qui ont besoin de voir de très loin étant donné l'altitude à laquelle ils doivent voler ont une vision centrale très développée. Les herbivores ont quant à eux développé la vision périphérique pour échapper aux prédateurs.

Un outil de substitution sensorielle doit forcément être utile au quotidien, pour que l'utilisateur soit motivé pour l'utiliser et que la perception liée à cet outil puisse se développer. L'outil de la canne électronique s'adresse avant tout aux adultes pour plusieurs raisons. La principale est que la majorité des cas de cécité concernent la cécité acquise à l'âge adulte. Les progrès du contrôle prénatal et le meilleur contrôle de l'oxygénation des couveuses ont fortement réduit les cas de cécité congénitale (Caillot C., 2004).

L'adulte en rééducation¹ veut des résultats rapides et tangibles pour persévérer. Dans le cadre d'un déplacement autonome quel qu'il soit, les **trois critères prépondérants pour un trajet sont : le degré de sécurité, la durée, l'énergie physique et cognitive requise.**

¹ L'OMS définit la rééducation comme un ensemble de « techniques qui visent à aider à réduire les déficiences et les incapacités du patient ».

Pour le déplacement d'un piéton aveugle, le coût est essentiellement celui de l'effort cognitif, alors qu'il est rarement conséquent pour un voyant (sauf difficulté à trouver sa destination) (PIGEON C., 2016, thèse).

Détaillons les trois critères primordiaux :

1. **La sécurité** : risques de collisions, accidents de circulation etc., diminution du taux d'appréhension de l'utilisateur. La rééducation en locomotion permet à un non-voyant de gérer ses déplacements en sécurité. Bien entendu le risque zéro n'existe pas, les stratégies de locomotion permettent au déficient visuel de se déplacer avec un risque socialement acceptable. Cela signifie que la probabilité d'accident est suffisamment faible pour que la réalisation de l'action associée (le déplacement autonome de la personne déficiente visuelle) ne soit pas considérée comme intrépide. Introduire une aide technique dans le déplacement va apporter des informations supplémentaires mais également capter l'attention de l'utilisateur. Ainsi, l'aide technique peut détériorer la sécurité de l'individu si elle donne des informations fausses ou capte à tort l'attention de l'utilisateur. Il est indispensable que le bilan d'une aide technique soit positif au niveau de la sécurité. Le balayage de la canne ne prémunit pas à 100% des chocs corporels, notamment les obstacles en hauteur comme les rétroviseurs ou les hayons de camion sont des causes fréquentes d'accidents. Le fait de découvrir la présence d'un obstacle par le biais d'un choc avec la canne ou le corps sans pouvoir l'anticiper est un élément stressant. Avoir **une trajectoire qui permet de trouver les passages dégagés et de s'y centrer** est le premier objectif que vise une canne électronique.
2. **Le temps de trajet** : le temps additionnel par rapport à celui d'un voyant reste-t-il fonctionnel ? Si une personne met cinq heures par ses propres moyens (en autonomie) pour faire un trajet qui se fait en 20 minutes pour une personne valide, son autonomie ne sera pas socialement acceptable. En effet une solution de déplacement par Taxi ou avec accompagnant sera utilisée, à la place. On peut considérer qu'un tiers temps supplémentaire n'est pas un obstacle, comme pour les examens des étudiants ayant un handicap. Un temps doublé est-il acceptable ? Cela dépend forcément du contexte. **Une aide technique qui ralentit l'individu à peu de chances d'être retenue**, elle doit a *minima* ne pas augmenter le temps de trajet.
3. **La fatigabilité mentale** : c'est aussi la charge cognitive nécessaire à la réalisation du trajet. Pour le déplacement piéton, la fatigabilité physique n'est pas le facteur primordial pour une personne n'ayant pas de problèmes moteurs. Dans le cadre du déplacement du piéton aveugle, l'absence d'informations visuelles oblige à développer une stratégie multisensorielle (audition, kinesthésie, etc.) complexe qui demande des efforts cognitifs conséquents (carte mentale, etc). Une aide technique qui ajoute des informations peut soit complexifier cette synthèse, soit la simplifier en fournissant des informations plus simples et sûres à utiliser. Pour le déplacement du piéton aveugle, **la charge mentale nécessaire, de base élevée, est un critère fondamental d'acceptation de l'aide.**

Pour effectuer cette thèse nous disposons d'**un outil utilisé au quotidien par les personnes non-voyantes, le « Tom Pouce » de troisième génération (TP3)**, et nous avons la main pour pouvoir améliorer à court terme cet outil puisque le programme de recherche de la quatrième génération a démarré pendant la dernière partie de cette thèse.

Cet appareil est utilisé au quotidien par des personnes non-voyantes, c'est-à-dire de catégories quatre et cinq selon la classification de l'OMS. Ces dernières ont suivi le processus de formation impliquant d'abord un bilan de deux heures de locomotion à la canne blanche et un essai ponctuel de l'appareil. A l'issue de ce premier examen, la personne est soit admise en formation canne électronique ; soit admise sous réserve d'une formation complémentaire de locomotion ; soit doit faire au préalable une rééducation complète à la mobilité. Les personnes admises en formation effectuent d'abord un premier stage de 12h de pratique étalé sur une semaine ; puis, un second stage de 12h de pratique également étalé sur une semaine. Il y a un suivi de trois heures, six mois plus tard, puis ensuite de deux heures tous les 24 mois.

Nos études font appel à des utilisateurs ayant eu une formation complète et au moins deux ans d'expérience d'utilisation quotidienne. Ceci permet d'analyser les processus perceptifs élaborés à partir de cet outil de substitution sensorielle. Pour ce faire, nous avons pris le parti de mettre en place des expérimentations qui sont les plus proches possibles des situations rencontrées dans la vie courante, principalement en extérieur.

L'outil canne électronique a pour objectif d'apporter une « vision artificielle » de l'environnement à quelques mètres de distance. Cette vision artificielle n'a de sens que si elle peut réduire les effets de l'absence de vision naturelle dans le comportement du non-voyant. Il y a très peu de dispositifs de vision artificielle et encore moins de dispositifs fonctionnels. Nous n'avons pas dans la littérature de description d'expériences comparant voyants et non-voyants avec des dispositifs de vision artificielle utilisés au quotidien dans la vie courante pendant plusieurs années.

Il est par contre connu que la qualité de la mobilité du non-voyant est fortement liée à son habileté en orientation spatiale (Ratelle et Couturier, 2019). Pour l'étude de l'état de l'art, nous allons donc nous tourner vers la littérature explorant les capacités de représentation spatiale des non-voyants dans différentes configurations. Ces études pourront nous donner des pistes d'expériences afin de mettre au point des protocoles de mesures structurés et robustes pouvant répondre aux questions suivantes :

- La trajectoire prise par un déficient visuel muni d'une canne électronique est- elle différente de celle prise par un utilisateur de canne blanche simple ?
- Quelles sont les spécificités de ces trajectoires ?
- Sont-elles comparables aux trajectoires réalisées par des sujets voyants ?

Dans un second temps, après avoir effectué une revue de littérature pour répondre à ces questions, nous avons essayé de trouver les modèles cognitifs dans le champ du mouvement humain pouvant le mieux structurer l'interprétation de nos observations et notamment les aspects liés à la représentation de l'espace à quelques mètres de distance.

L'objectif final de ce travail est d'observer et comprendre le comportement des utilisateurs dans des situations maîtrisées et reproductibles proches de celles de la vie courante. Afin de pouvoir

définir des voies d'amélioration pour la future génération d'appareils et pour continuer d'améliorer la mobilité des non-voyants suivant les trois axes cités à savoir : la sécurité, l'efficacité et la réduction de la charge cognitive. Nous essaierons d'atteindre cet objectif grâce à notre contribution expérimentale organisée autour de deux parties : « la localisation d'objets dans l'environnement », et « la perception de la passabilité au service de la locomotion ». Chacune de ces deux parties présente les résultats de plusieurs expériences. Enfin, le mémoire se termine par une analyse détaillée du flux d'informations reçu par l'utilisateur et de son exploitation afin d'interpréter et de discuter les conclusions des différents protocoles. Cette discussion nous permet d'ouvrir diverses perspectives de prolongation de notre objectif de recherche.

II. Etat de l'art

La canne électronique est un dispositif de substitution sensorielle dont l'objectif est de fournir aux déficients visuels une perception fonctionnelle de l'environnement à quelques mètres de distance. Nous allons donc initier l'état de l'art en abordant dans un premier temps la définition de la déficience visuelle ainsi que les concepts théoriques sur la mobilité des personnes non-voyantes. Notre état de l'art se basera sur la littérature scientifique, mais également sur les connaissances empiriques dont se servent les thérapeutes de terrain, qui, même si elles font l'objet de publications moins formalisées, peuvent fournir des hypothèses de travail intéressantes et robustes. Par contre, nous n'aborderons pas dans le détail la littérature en neuroscience sur la plasticité cérébrale accompagnant la déficience visuelle, qui sort du cadre de ce travail.

II.1. La représentation de l'espace chez les personnes non-voyantes

II.1.1. Définitions de la déficience visuelle

En France, il y a environ 60 000 personnes non-voyantes. En fonction du bilan visuel réalisé par un ophtalmologue, la personne est considérée comme non-voyante lorsque son acuité visuelle est inférieure à 1/20^{ème} après mise en œuvre des moyens possibles de correction. Il existe plusieurs causes de la malvoyance, à savoir (Raynard, 1991) (Griffon, 1993) :

- Les accidents de la circulation, les accidents du travail et certaines tentatives de suicide.
- Les infections virales de la cornée (kératites) qui peuvent être traitées par des greffes de la cornée.
- Le glaucome qui provient d'une pression excessive des liquides intraoculaires. 1% de la population en Europe est touchée, surtout les personnes âgées. Il peut être enrayeré par médication en cas de dépistage précoce.
- La cataracte est une opacification du cristallin affectant essentiellement les personnes âgées, le traitement est chirurgical.
- La rétinopathie est une lésion de la rétine d'origine non infectieuse, principalement liée au diabète. Elle est traitée par des médicaments et en faisant recours à la photocoagulation au laser.
- L'onchocercose, ou autrement dit « cécité des rivières », est une maladie transmise par une mouche (simulie), inoculant des larves vivant dans les tissus sous-cutanés et les yeux.
- Le trachome, conjonctivite granuleuse de type viral, est favorisé par le surpeuplement et l'insalubrité. Le traitement est à base d'antibiotiques, il n'y a pas de vaccins efficaces.
- La xérophtalmie est une sécheresse de la conjonctive et de la cornée due essentiellement à la malnutrition et aux carences en vitamines A et B₁ qui en résultent. Cette affection touche particulièrement les enfants.

- Les affections congénitales ou héréditaires parmi lesquelles on peut citer les tumeurs cancéreuses (gliome) au développement précoce chez l'enfant, le traitement est chirurgical à base de radiothérapie ; la rétinite pigmentaire, maladie évolutive par paliers sur une très longue durée, entraînant souvent la cécité.
- Divers traumatismes comme : le décollement de la rétine, les hémorragies du vitré, les lésions de la cornée, du globe, etc. Les causes sont diverses et les traitements sont chirurgicaux ou par photocoagulation au laser.

L'organisation mondiale de la santé « l'OMS » classe les déficiences visuelles en cinq catégories (OMS) :

Catégorie OMS	Conditions sur l'acuité visuelle	Type d'atteinte visuelle (CIM-10)	Type de déficience visuelle (CIH)
Catégorie I	Acuité visuelle corrigée binoculaire <3/10 et > ou = à 1/10 avec un champ visuelle d'au moins 20 degrés	Basse vision ou malvoyance	Déficience moyenne
Catégorie II	Acuité visuelle corrigée binoculaire <1/10 et > ou = à 1/20		Déficience sévère
Catégorie III	Acuité visuelle corrigée <1/20 et > ou = à 1/50 ou champ visuel < à 10 degrés mais > à 5 degrés		Déficience profonde
Catégorie IV	Acuité visuelle < à 1/50 mais perception lumineuse préservée ou champ visuel < à 5 degrés	Cécité	Déficience presque totale
Catégorie V	Cécité absolue, absence de perception lumineuse	Cécité	Déficience totale

Tableau 1.1 : Classification de la déficience visuelle selon L'OMS en cinq catégories.

Les dispositifs de substitution sensorielle concernent les catégories IV et V de la classification OMS.

II.1.2. Les conséquences de la déficience visuelle

La perte de la vue engendre une double atteinte : d'une part, une atteinte physiologique liée à la pathologie ayant entraîné la cécité ; et d'autre part, une atteinte fonctionnelle liée aux conséquences de la pathologie sur la vie quotidienne du sujet (Griffon P., 1993). Parce que la vue occupe une grande partie de notre activité cérébrale, sa perte engendre une réorganisation neurofonctionnelle importante (Raynard, 1991). Les conséquences de la perte de vision se font à plusieurs niveaux et sont d'importance très variable d'une personne non-voyante à l'autre. Par

exemple, les conséquences et les vécus ne sont pas les mêmes pour une cécité congénitale, une cécité acquise, une personne jeune ou âgée, pour une cécité récente ou ancienne, pour une atteinte d'origine accidentelle ou d'origine malade, etc.

Selon Raynard (Raynard, 1991), le non-voyant ne peut plus mesurer l'écart entre l'objectif de son action et les effets réellement obtenus. La littérature identifie quatre limitations de base affectant l'acquisition des connaissances chez les non-voyants (Raynard, 1991) :

- i. Limitation du nombre et de la variété des expériences.
- ii. Limitation de la capacité à se déplacer.
- iii. Limitation du contrôle de ce qui se passe au sein du milieu (relation environnement – environnement).
- iv. Limitation des vecteurs de communication formés par la relation corps – environnement, et environnement-corps.

Ces limitations engendrent une diminution de la qualité de vie quotidienne de la personne. L'OMS définit la qualité de vie comme étant : « la perception qu'a un individu de sa place dans la vie, dans le contexte de la culture et du système de valeurs dans lequel il vit, en relation avec ses objectifs, ses attentes, ses normes et ses inquiétudes. C'est un concept très large qui peut influencer de manière complexe la santé physique du sujet, son état psychologique, son niveau d'indépendance, ses relations sociales et sa relation aux éléments essentiels de son environnement » [A1] (World Health Organisation - OMS, 1993). Certains auteurs soulignent qu'en effet le bien-être psychologique des personnes non-voyantes ou ayant une déficience visuelle est moins élevé que celui des personnes voyantes (Nyman et al., 2009) (Pinquart & Pfeiffer, 2011).

De même, la cécité engendre des conséquences sur le plan fonctionnel. La perte de la vision limite les capacités de la locomotion ainsi que l'information sur le résultat concret d'une manipulation. Plusieurs enquêtes décrivent les difficultés des personnes non-voyantes à se déplacer. Citons à titre d'exemple l'enquête HID (Sander et al., 2005), elle révèle que plus de 90% des personnes présentant une déficience visuelle en France ont des difficultés pour se déplacer à l'extérieur. Plus précisément, 29% des adultes ayant 20 ans et plus ne peuvent se déplacer seuls hors de chez eux. Uniquement 15% d'entre eux peuvent se déplacer seuls mais dans certains trajets bien précis et familiers. Les personnes déficientes visuelles qui se déplacent ont un risque important d'être victime d'un accident. Manduchi & Kurniawan (Manduchi & Kurniawan, 2011) ont réalisé une étude sur la fréquence et les conséquences des accidents des personnes ayant une déficience visuelle lors de leurs déplacements. Ils ont relevé deux types d'accidents :

- Les chutes représentent 40% des accidents, elles arrivent plus d'une fois par an. Les causes de chutes souvent invoquées sont la présence d'un obstacle inhabituel sur des trajets familiers, le manque d'attention aux avertissements donnés par le chien guide, la mauvaise estimation des distances².
- Les chocs au niveau de la tête représentent 60% des blessures. Ils sont souvent liés à des collisions avec des branches d'arbres, poteaux, panneaux, etc.

² L'estimation des distances est un des éléments étudiés dans notre contribution expérimentale.

Ces difficultés à se déplacer ont des répercussions négatives sur la santé physique et psychique de la personne : ne sortir uniquement qu'avec une assistance humaine, un manque de confiance en soi, une diminution dans la vitesse de la marche, etc. Plus la personne non-voyante est âgée, plus les risques de chutes et de ne pas sortir de chez soi sont élevés (Black & Wood, 2005) (Legood, Scuffham & Cryper, 2002).

II.1.3. La prise en charge en rééducation

Il est nécessaire de prendre en compte la globalité du patient pour la prise en charge rééducative, c'est-à-dire non seulement les aspects psychologiques et psychosociaux du sujet, mais également les données cognitives et comportementales (par ex., mnésiques, adaptatives, psychomotrices et sensorielles). Ce travail de diagnostic est essentiel pour apprécier la faisabilité de la rééducation (Griffon P., 1993).

Pour que la personne puisse se déplacer, elle a besoin de s'orienter dans l'espace et de maintenir son orientation pendant le déplacement. On parle donc de deux principales tâches : la locomotion et la navigation (Pigeon C., 2016). Thinus-Blanc et Gaunet (1997) ont décrit la vision comme étant « le sens spatial par excellence ». Elle permet une compréhension très rapide de l'agencement de l'espace. La vue offre une meilleure estimation des angles et des distances aux objets que l'audition (Thinus-blanc & Gaunet 1997). Gibson et Schumuckler (1989) ajoutent que dans le contexte de la locomotion, la vision est utile dans les trois principales fonctions : le maintien de la stabilité posturale, la détection d'informations nécessaire pour traverser l'endroit et le guidage vers la destination. Les personnes non-voyantes développent des stratégies (cognitives et sensori-motrices) et se servent d'aides techniques pour arriver à destination. La plupart de ces personnes sont formées par des « instructeurs de locomotion » selon le terme utilisé en France ou/et « instructeurs en orientation et mobilité » dans les pays anglo-saxons.

Ce métier d'instructeur ou cette discipline est apparue après la Seconde Guerre Mondiale aux Etats-Unis et s'est développée par la suite en Angleterre (Piriou, 1999). Les premiers instructeurs de locomotion ont été formés en 1967 en France par les Américains de la Fondation H. Keller (Buissard, 2014). De nos jours, la fédération des aveugles de France (FAF) administre la formation des instructeurs de locomotion en France. Pour obtenir ce titre il faut suivre une formation de huit mois, après avoir obtenu un diplôme dans les disciplines suivantes : ergothérapie, kinésithérapie, psychomotricité, infirmier, éducateur spécialisé, titulaire d'une licence STAPS (sciences et techniques des activités physiques et sportives). Depuis 2020, la formation des instructeurs de locomotion est fusionnée avec celle des Avéjistest³ donnant lieu à un diplôme polyvalent « locomotion, activités de la vie journalière ». Les instructeurs de locomotion interviennent dans des centres de rééducation, des associations, des institutions spécialisées ou des services d'aide à l'intégration scolaire. La rééducation en locomotion permet de travailler sur l'éveil et l'utilisation des autres sens (audition, odorat, etc.), sur la cognition pour représenter des schémas ou cartes mentales de l'environnement (quartiers, rues, etc.) et sur les émotions pour confronter leurs peurs et anxiétés lors de leurs déplacements (Buissard, 2014) (Carrer, 2012). Le

³ Thérapeute enseignant les activités de la vie quotidienne au déficient visuel (cuisine, rangement, informatique de base, etc.)

but du professionnel de locomotion est de favoriser l'autonomie, la sécurité et le confort de la personne non-voyante lors des déplacements, tout en prenant en compte les besoins et les possibilités de la personne (Buissard, 2014).

La prise en charge diffère forcément en fonction de l'âge d'apparition de la cécité (Piriou, 1999). Par exemple, la personne aveugle précoce doit en priorité apprendre à se déplacer dans un environnement urbain et à comprendre sa structure. Tandis que la personne aveugle tardive doit apprendre à intégrer et identifier à l'aide des autres sens les éléments constituant l'environnement qu'elle a visuellement connu (Piriou, 1999). Lors de la prise en charge, la personne non-voyante ou malvoyante doit apprendre à s'orienter dans l'espace. Les techniques de locomotion incluent l'apprentissage de la gestion des obstacles et des dénivelés. De même, l'orientation spatiale, l'utilisation des points de repères ou la création d'une représentation mentale de l'espace s'améliorent avec l'apprentissage de la prise d'informations. L'apprentissage de la locomotion avec canne se fait d'une façon progressive en démarrant par des endroits familiers pour élargir et arriver à naviguer dans des endroits plus complexes et inconnus (Piriou, 1999). En outre, les professionnels forment aussi les patients à devenir autonome en utilisant les aides technologiques ou le chien guide lors des déplacements. Un travail au quotidien est demandé aux personnes non-voyantes car la locomotion nécessite beaucoup d'exercices et de pratique.

II.1.4. Les concepts théoriques pour comprendre la mobilité des personnes malvoyantes

II.1.4.1 Les liens perception-action

Dans un article de synthèse Loomis (Loomis, 2003) résume trois différentes approches théoriques reliant les entrées sensorielles visuelles à l'action. **L'approche dite « écologique »** de James J. Gibson (Gibson & Gibson, 1955) ne fait pas intervenir la cognition, elle suppose un lien direct entre des invariants optiques (propriétés du flux optique) et des actions associées. Ainsi, un invariant optique spécifie de façon univoque une action. Le « flux radial » sert à pointer, le « taux d'écartement » (l'angle que fait la piste projetée par rapport à la verticale, splay rate, en anglais) sert à corriger l'alignement avec une route ou un trottoir, l'« expansion optique » sert à freiner. A contrario, dans **l'approche cognitive**, l'individu se construit un espace visuel, une « représentation spatiale » des objets dans le monde, sur la base de laquelle il contrôle ses actions. Ce percept spatial provient d'une part des informations visuelles et d'autre part des connaissances acquises par la personne au travers de son expérience sur l'espace et les objets (cf. figure 1.1). Enfin, **l'approche dite des « deux systèmes visuels »** complète l'approche cognitive en reconnaissant le fait qu'il existe des circonstances où le contrôle visuo-moteur ne dépend pas d'une perception visuelle consciente de l'espace. Comme l'ont montré Milner et Goodale (1995) des patients atteints de lésions cérébrales spécifiques (des régions occipito-temporales) peuvent atteindre et saisir des objets qu'ils ne peuvent pourtant pas identifier visuellement consciemment.

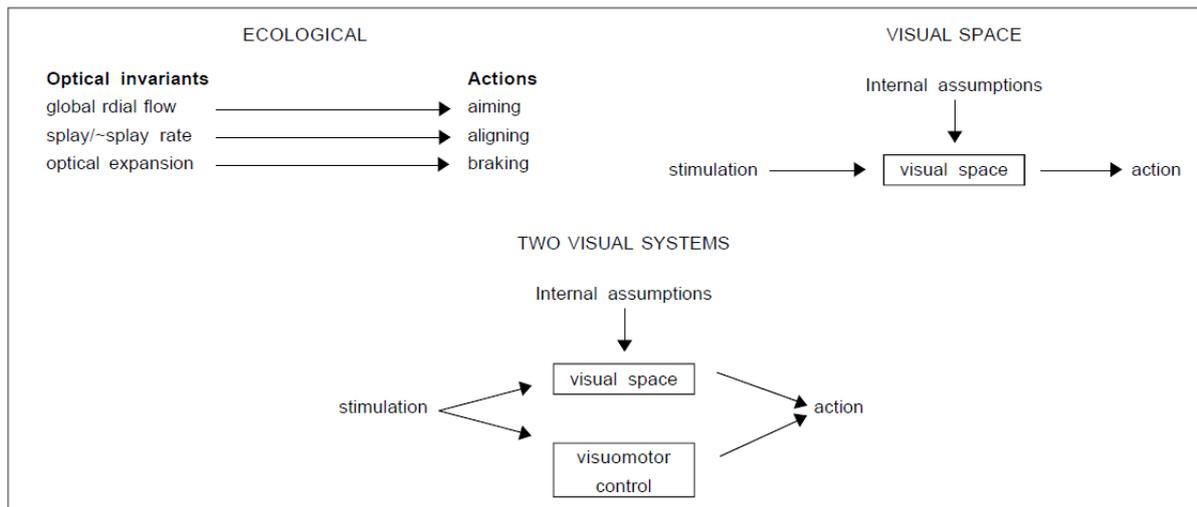


Figure 1.1 : Les trois conceptions de la relation entre perception visuelle et action d’après Loomis (2003).

Il est intéressant de se demander si cette description concernant les liens entre la vue et l’action est applicable aux non-voyants. On pourrait penser par exemple que la réaction d’arrêt brutal d’un non-voyant à sa canne qui plonge dans le vide reflète un contrôle moteur basé sur des invariants de type écologiques. Par contre, l’initiative de prendre un raccourci encore jamais emprunté pour aller d’un point à un autre dans un quartier connu est une action nécessitant l’utilisation d’une représentation spatiale. En effet, cette initiative peut être la conséquence du traitement perceptif d’une information auditive indiquant qu’une voiture a emprunté la voie par exemple, et d’une structure mentale du quartier déjà construite (sans connaissance de cette voie) permettant de déduire que cette voie est un raccourci.

L’article de Strelow (1985) proposant **“une théorie de la mobilité”** permet de concilier les approches écologiques et cognitives que nous venons d’exposer. Edward Strelow indique que la navigation de la personne aveugle est très désavantagée par rapport aux personnes voyantes. Les informations environnementales disponibles pour les non-voyants sont très limitées et les stratégies nécessaires pour acquérir des compétences de déplacement sont difficiles. Malgré cela, les personnes non-voyantes ont montré leur capacité à acquérir les compétences de déplacement en intégrant les informations spatiales et les stratégies nécessaires. Le fait qu’un piéton non-voyant réussisse à se déplacer même avec une compétence modérée indique que la mobilité n’est pas nécessairement une compétence visuelle, malgré son importance pour les voyants.

Gibson distingue la perception du mouvement d’un objet dans l’environnement et de la perception du mouvement propre (de soi) dans la mobilité. Il est vrai que les informations de mouvement propre d’origine visuelle (Lee, 1978) sont absentes chez les non-voyants. Toutefois, diverses informations non-visuelles aident le non-voyant à se repérer, à trouver sa cible et sa destination : la proprioception, l’audition (par exemple les échos créés par le voyageur quand il tape sa canne contre le sol), l’odorat, etc. La canne blanche longue et le chien guide ont remarquablement contribué à la mobilité des personnes aveugles.

Le “sens des obstacles” (appelé aussi “vision faciale” ou “écholocation” ou “sens des masses”) chez les personnes non-voyantes est également fréquemment étudié (Cotzin & Dallenbach, 1950; Kellogg, 1962; Rice & Feinstein, 1965) (Strelow, 1985, p.233). Strelow (Strelow, 1982) a étudié la locomotion des personnes non-voyantes contrôlées par écholocation. Ils ont donc réalisé une étude avec des participants voyants et non-voyants sous bandeaux pour mesurer la précision du

contrôle de la locomotion en utilisant l'écho naturel des obstacles pour localiser un chemin lors d'un déplacement. Ces mesures étaient comparées à la précision du guidage visuel. Les résultats ont montré que les non-voyants exploitent mieux que les voyants sous bandeaux les échos pour se guider. Le guidage par écholocation reste toutefois nettement inférieur au guidage visuel, et le sens naturel d'« écholocation » des obstacles ne donne que la perception de la présence des objets, mais ne fournit pas d'informations spatiales suffisantes pour contrôler précisément la locomotion, qui est affectée par la taille et l'espacement des cibles utilisées pour le guidage. Selon Strelow (1985) l'équivalent du flux visuel pour le guidage de la locomotion chez les non-voyants serait, en plus de **l'écholocation**, l'ensemble des stimuli disponibles pour se guider. Il indique : *“Il y a beaucoup de stimuli, autres que les échos, pour guider les déplacements. De nombreux indices sonores normaux peuvent servir de guide : Le bruit de la circulation crée un mur de sons d'un côté du voyageur, et les véhicules individuels, tels qu'une moto bruyante s'éloignant au loin, offrent un point de repère auditif. Certains objets de l'environnement, comme une cabine téléphonique entre le voyageur et la rue, atténuent de manière audible les fréquences supérieures du son ambiant. Il existe souvent des signaux olfactifs distinctifs provenant de lieux spécifiques comme les boucheries, les magasins de chaussures et les boulangeries. Des indices divers, comme les rafales de vent ou l'apparition ou la disparition du soleil lorsqu'on tourne au coin d'un bâtiment, peuvent être ressentis sur la peau ou par la vision résiduelle (Ammons et al., 1953).”* (Strelow, 1985, p.234)

Un des éléments limitant pour les aides techniques est la charge cognitive disponible pour traiter des informations sensorielles. On sait depuis les travaux princeps de Miller (1956) qu'il existe un goulet d'étranglement dans notre traitement cognitif. De plus le phénomène du clignement attentionnel (crossmodal attentional blink) fait que si on est concentré sur des informations visuelles, on peut ne pas entendre un bruit. De même être absorbé avec des informations auditives, ou tactiles, peut altérer le traitement des informations issues d'autres modalités sensorielles (Soto-Faraco, 2002). Une expérience sensorielle simple à faire peut l'illustrer, prenez une canne blanche, mettez un bandeau sur les yeux avec un sopalin dessous, cela le rend totalement étanche (plus de possibilités de regarder ses pieds ou dans les coins) et marchez dans une allée de parc bien dégagée et sécurisée, sans trous ni bosse, et déserte. Au bout de quelques minutes vous allez être convaincu que quelqu'un vous suit en marchant dans vos pas, cela peut même être angoissant, jusqu'à comprendre ce qui se passe: en fait, vous percevez l'écho du bruit de vos pas, une information sonore généralement masquée par la vue car on n'y prête pas attention. Il se peut aussi que vous vous posiez une seconde question : en principe j'étais dans une allée plane, mais j'ai la sensation qu'elle est en pente... Oui, elle est effectivement en pente mais faiblement. En retirant le bandeau et en observant maintenant l'environnement visuellement de manière attentive vous pourrez vérifier que c'est vrai. Par contre, quand vous marchez avec la vue, les informations visuelles seront très certainement plus fortement pondérées dans l'intégration sensorielle que les informations proprioceptives (pieds, etc.) dans la perception des pentes. Cette combinaison d'informations multisensorielles est fonctionnelle car elle vise à minimiser nos erreurs de perception. En effet, certains auteurs ont montré une surestimation (jusqu'à +100%) des pentes (entre 4° et 16°) par la proprioception statique des pieds chez les aveugles et les voyants sous bandeau (Hajnal et al., 2011).

Cette question d'un filtrage attentionnel (et possible goulet d'étranglement) pour prendre en compte un type d'information ou pas est fondamentale pour le contrôle des déplacements. Cela met d'emblée la barre très haute pour un dispositif d'apport de substitution sensorielle dont les informations vont être en compétition avec des informations naturelles que le système cognitif traite de façon naturelle. L'utilisateur doit apprendre à pondérer (en donnant plus ou moins de

poids à telles ou telles informations) et combiner ces informations afin d'en faire une synthèse multisensorielle au service de l'action fonctionnelle. C'est le rôle d'un instructeur de locomotion que ce soit à la canne simple, à la canne électronique ou au chien guide, d'introduire un nouvel outil dans cette synthèse sensorielle, avec une sélection et hiérarchie fonctionnelle des informations incluant celle de l'outil (à condition que l'outil soit suffisamment efficace pour que cela en vaille la peine). Cette éducation de l'attention fait écho à la notion gibsonienne d'apprentissage perceptif (perceptual learning), tel que le souligne Strelow (1985).

Dans le même ordre d'idée, Rieser (1990) propose un modèle de la mise à jour des informations spatiales en l'absence momentanée de vision (Mittelstaedt et Mittelstaedt, 1980) par lequel une double intégration des mesures d'accélération effectuées par le système vestibulaire permet de récupérer la position de la personne qui se déplace. Le modèle d'« apprentissage perceptif » se base sur l'hypothèse que toute personne ayant eu une expérience locomotrice visuelle a appris au quotidien la corrélation entre le flux optique et le flux biomécanique. Par conséquent, quand l'information visuelle est absente, le cerveau stimulerait mentalement le flux optique sur la base du flux biomécanique, grâce à la redondance fonctionnelle des différentes sources de réafférences de l'action (Rieser, 1990).

Afin de valider cette hypothèse d'apprentissage perceptif, Rieser et al. (1995) ont effectué une série d'expériences testant la possibilité d'une recalibration du couplage flux visuel/biomécanique dans différentes tâches, parmi lesquelles le pointage locomoteur et le lancer de projectile vers une cible mémorisée. Tout d'abord les participants devaient observer l'environnement tout en marchant sur un tapis roulant tiré par un tracteur (cf. Figure 1.2). Selon la condition, à vitesse de marche sur le tapis roulant équivalente, la vitesse du tracteur était soit (1) plus rapide (flux biomécanique < flux visuel), soit (b) plus lente (flux biomécanique > flux visuel). Dans une condition contrôle, un pointage locomoteur en l'absence momentanée de vision était effectué par le participant avant la phase de calibration. Dans les conditions expérimentales, après 8 minutes de recalibration, les performances de pointage locomoteur ont

montré qu'en condition (a) les sujets s'arrêtaient systématiquement avant la cible, alors qu'en condition (b) ils dépassaient la cible.

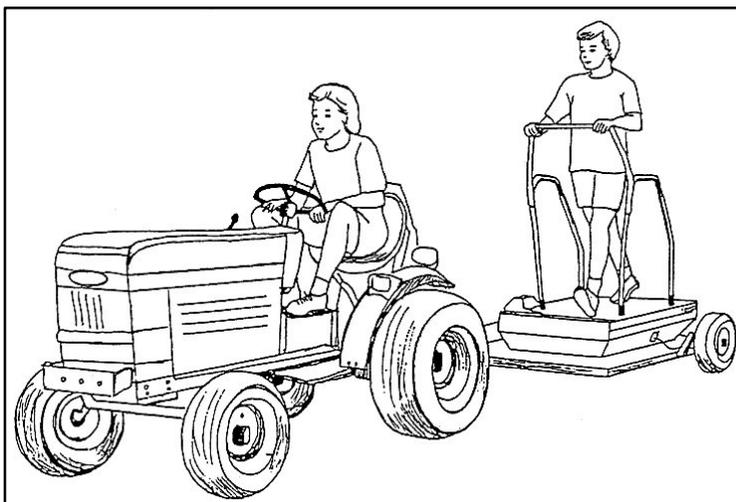


Figure 1.2. Dispositif expérimental servant à recalibrer la co-variation entre flux biomécanique et flux optique dans Rieser et al. (1995).

Dans la tâche de lancer de projectile, pour la phase de recalibration, les sujets étaient debout statiques sur le tapis roulant qui était déplacé par le tracteur, et essayaient d'atteindre des cibles par lancer de projectile soit (c) orientés dans la direction du déplacement (en lançant à 20° sur le côté), soit (d) en étant dos à la direction du déplacement. Après cinq minutes de recalibration, les sujets descendaient du

chariot, et lançaient des projectiles vers une cible mémorisée, une fois les yeux fermés. Par rapport à la condition contrôlée où des lancers étaient effectués avant la phase de recalibration, les performances après la condition (c) ont montré que les sujets lançaient le projectile avant la cible, alors qu'après la condition (d) le projectile arrivait systématiquement au-delà de la cible. Encore une fois, les résultats suggèrent qu'une fois les yeux fermés les sujets contrôlent leur mouvement sur la base de la nouvelle corrélation apprise entre le flux biomécanique (le lancer de projectile) et le flux optique. De façon intéressante, la recalibration du pointage locomoteur n'avait aucun impact sur le lancer de projectile les yeux fermés, et réciproquement, la recalibration du lancer de projectile ne se généralise pas au pointage locomoteur. Selon ces auteurs, ces résultats sont incompatibles avec l'hypothèse d'une organisation fonctionnelle globale des calibrations sensori-motrices, car la recalibration de la relation entre les différents flux ne généralise pas à des catégories d'action sans rapport fonctionnel (Rieser et al., 1995). Ces travaux initiaux de recalibration entre flux optique/biomécanique par Rieser et al. (1995) ont été répliqués en utilisant la réalité virtuelle (au lieu de véhiculer le participant sur un tracteur) par Mohler et al (2007) puis par Kunz et al (2013).

II.1.4.2. Le rôle de l'expérience visuelle dans la représentation de l'espace

La littérature sur la représentation spatiale des non-voyants s'est essentiellement structurée sur la recherche de différences entre les non-voyants congénitaux et acquis, en cherchant à comprendre le rôle de l'expérience visuelle. La revue de littérature de Thinus-Blanc et Gaunet (1997) souligne la présence de nombreuses études contradictoires. Dans certaines études, le passé visuel est un avantage clair, pour d'autres, il n'y a pas de différences significatives entre le groupe de cécité congénitale et de cécité acquise. Dans cette revue de littérature, les auteurs soulignent la difficulté à reconstruire une représentation globale à partir d'informations séquentielles, sans avoir eu l'exemple de la perception visuelle qui donne d'emblée une vision d'ensemble de la situation. Il est suggéré aussi que les différences entre les études sont en partie liées aux différentes tâches demandées. Ainsi, en ce qui concerne la mémoire spatiale, certains auteurs n'ont pas trouvé de différences entre les personnes non-voyantes précoces et tardives. Par exemple, les participants de Barber et Lederman (1988), apprenaient l'emplacement d'objets sur une table par rapport à un emplacement, puis devaient pointer vers eux depuis un nouvel emplacement après un mouvement imaginaire ou réel. Pour cette tâche, Hollins et Kelley (1988) ont trouvé que les erreurs de pointage depuis le nouveau point de pointage étaient plus importantes pour les participants non-voyants de naissance, mais leurs performances ont atteint celles des participants voyants lorsqu'ils leur ont demandé de remplacer l'objet sur la table (au lieu de pointer vers lui) après un déplacement réel.

Rieser et al. (1982) ont utilisé des tâches locomotrices impliquant des transformations spatiales (de type "changement de point de vue") afin d'évaluer l'effet de la cécité précoce sur la mémoire spatiale chez 18 voyants et 12 aveugles. Les participants ont été guidés (sous bandeau pour les voyants) d'un lieu de départ vers six autres lieux marqués par des objets, dans un environnement inconnu (une pièce d'environ 6 m x 9 m). Après chaque trajet du départ à l'un des six lieux, le participant était ramené au départ, comme illustré dans la figure 1.3. Pour vérifier l'apprentissage de la configuration spatiale des objets, les participants devaient pointer vers chaque objet (dans un ordre aléatoire) depuis le point de départ. Dans une tâche dite de "Locomotion", les

participants étaient amenés en marchant jusqu'à un des emplacements d'objet d'où ils devaient pointer vers un des autres objets (indiqué par l'expérimentateur). Dans une autre tâche dite "Imagination", les participants restaient au point de départ et devaient imaginer se localiser au niveau d'un objet faisant face à un autre objet, à partir de quoi ils devaient pointer rapidement vers chacun des autres objets depuis ce point de vue imaginaire. Dans la tâche de locomotion les performances des aveugles tardifs et des voyants ne se distinguaient pas, et étaient bien meilleures que celles des aveugles précoces. Par contre, en ce qui concerne la tâche "Imagination", tous les groupes l'ont trouvé difficile, et ne se distinguent pas vraiment en termes de performance.

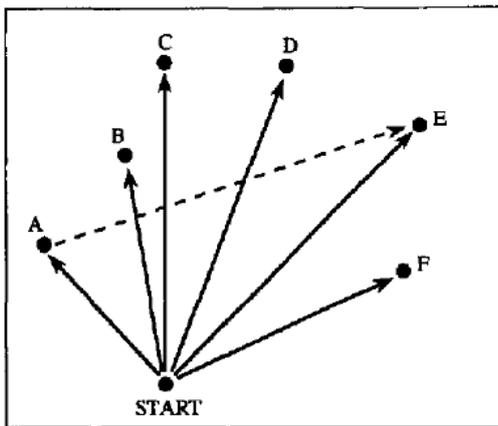


Figure 1.3 : Illustration du protocole expérimental de Rieser et al. en 1982, 1986. (empruntée à Thinus-Blanc & Gaunet, 1997) avec une représentation schématique de configuration spatiale d'objets. Les traits pointillés illustrent un essai d'inférence spatiale où le participant se trouve à l'emplacement de l'objet A faisant face à l'objet B, et doit ensuite pointer vers tel ou tel autre objet.

Loomis et al (1993) a inclut des voyants sous bandeaux, des non-voyants congénitaux et tardifs, pour effectuer des tâches d'inférence simples, telles qu'une complétion locomotrice d'un triangle (cf. Figure 1.4). Ils n'ont trouvé aucun effet lié à l'expérience visuelle entre les groupes.

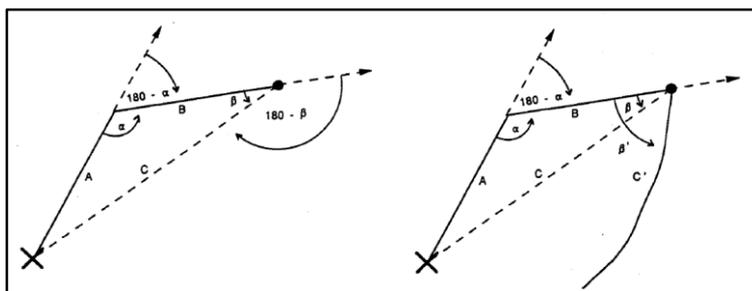
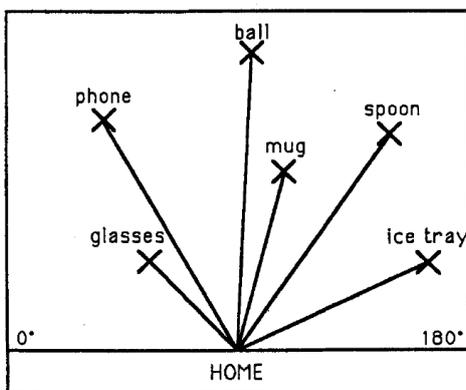


Figure 1.4 : Illustration du protocole de complétion locomotrice d'un triangle en l'absence de vision dans l'étude de Loomis et al (1993). Le participant marche le long de deux segments, guidé par l'expérimentateur, au bout duquel il doit revenir au point de départ.

Les auteurs ont supposé que la tâche demandée (complétion locomotrice d'un triangle en l'absence de vision) était trop simple. Pour cette raison, ils ont reproduit l'expérience de Rieser et al (1986) avec des objets placés sur des tabourets dans une grande pièce (cf. figure 1.5.). Cette dernière nécessite plus de mémorisation et d'inférence spatiale que la tâche de la première expérience, vu qu'elle demande d'apprendre l'emplacement de plusieurs objets et de mettre à jour sa position pendant la locomotion. Ils n'ont pas trouvé comme Rieser que le groupe des non-voyants de naissance avaient un moins bon score que les autres. A la place, ils ont souligné le caractère hétérogène de l'échantillon pour les personnes non-voyantes. Ils ont expliqué que les données divergentes étaient dues à la manière dont les participants aveugles ont été sélectionnés. Ils ont émis l'hypothèse que la procédure de sélection ait été biaisée. En effet, les participants retenus par Loomis et al. (1993) pour participer

à leur étude avaient tous une mobilité autonome, et d'après eux des compétences de mobilité supérieures à la moyenne des non-voyants. Donc l'expérience de la personne et son entraînement ou pas peut affecter les résultats d'une personne à l'autre, comme l'étude de cas de la petite Kelli, âgée de deux ans et non-voyante de naissance (Landau, Gleitman and Spelke 1984). Les résultats ont montré que la performance de la fille était similaire à un enfant sous bandeau voyant du même âge. Loomis et ses collaborateurs expliquent donc que l'effet de l'expérience visuelle (différence de performance spatiale selon que l'on est aveugle précoce, tardif, ou voyant) variable en fonction des études viendrait d'un biais de sélection des participants. Par ailleurs, Strelow (1985) indique que les comparaisons directes entre les non-voyants et les voyants ne sont pas non plus généralement convaincantes car les non-voyants se comparent inévitablement mal aux voyants en termes de fréquence de déplacement et de quantité d'expérience spatiale. Il n'est souvent pas clair si la démonstration des différences significatives entre les deux groupes implique une différence qualitative de capacité. Mais il n'y a rien qui indique que les non-voyants sont en principe incapables de comprendre les concepts spatiaux, comme nous allons le voir dans la section suivante (Kennedy, 1982 ; Morgan, 1978 ; Rieser, 1983, Rieser, Lockman & Pick, 1980).

Contrairement à Rieser et al (1986), d'autres études n'ont pas mis en évidence une dégradation des performances de navigation ou d'orientation spatiale en lien avec l'absence d'expérience visuelle. Loomis et al. (1993) par exemple ont également testé des participants non-voyants de naissance, non-voyants acquis et voyants sous bandeaux sur une série de tests de complexité variable. Les participants étaient guidés par un expérimentateur le long de voies rectilignes ou comportant des virages d'amplitudes variées. Il leur était demandé de reproduire les parcours sans utiliser d'aide. L'estimation angulaire des virages se faisait par les participants à l'aide d'un



pointeur. Aucune différence de performance entre les groupes n'a été trouvée en fonction de l'expérience visuelle. Dans les expériences où les participants devaient apprendre un itinéraire, aucune différence n'a été trouvée en ce qui concerne le moment d'apparition de la cécité.

Figure 1.5 : Configuration spatiale des objets utilisés dans la tâche de mise à jour des informations spatiales dans l'étude de Loomis et al. (1993), tâche inspirée par l'expérience de Rieser et al (1982). "Home" représente l'endroit à partir duquel les participants marchaient jusqu'à chaque objet posé sur un tabouret à hauteur de la taille. Pour avoir une idée des distances, la balle est située à 5.24 m de "Home".

Gaunet et Thinus-Blanc (1996), ont réalisé une étude sur les capacités spatiales des sujets non-voyants précoces dans l'espace. Le but de cette étude est d'analyser l'effet de manque d'expérience visuelle chez les sujets non-voyants précoces dans la détection du réarrangement des objets après une exploration libre de l'endroit. L'étude était réalisée dans une salle fermée et non familière pour les sujets. Elle était constituée de deux phases, la phase d'exploration pour se familiariser avec l'endroit et les objets en gardant les écouteurs. Pour la deuxième phase, il était demandé au sujet d'explorer la salle pendant 14 minutes afin de mémoriser l'endroit des quatre objets placé dans la salle. Ensuite, les objets étaient déplacés et il était demandé au sujet de les remettre à leur endroit initial. Les résultats ont montré des différences significatives au niveau

des performances et des patterns d'exploration des sujets précoces par rapport aux autres sujets voyants sous bandeaux et aux non-voyants tardifs. Plus précisément, les participants non-voyants précoces étaient plus lents en moyenne, la justesse des déplacements d'objets était inférieure aux autres groupes.

Hill et ses collaborateurs (1993) ont étudié comment les personnes déficientes visuelles explorent les nouveaux espaces, notamment les stratégies correspondant à de bonnes ou mauvaises performances. Ils ont donc examiné dans cette étude les enregistrements vidéos des modèles de recherche et des stratégies d'exploration spatiale spontanées de 65 personnes ayant une déficience visuelle pour localiser et apprendre l'arrangement de cinq objets dans un espace inconnu (un gymnase). Le but est d'observer les stratégies d'exploration les plus pertinentes et utiles pour localiser les objets en illustrant les résultats du pattern d'exploration spatiale spontané, minute après minute, chez trois participants (Hill et al.; 1993).

Les stratégies d'exploration observées ont été les suivantes :

- Stratégie de recherche périmétrique (*perimeter search method*): on établit un point de départ (en général la porte d'entrée de la pièce), on fait le tour de la pièce en suivant les murs extérieurs en cherchant les objets à proximité, pour revenir au point de départ.
- Stratégie de la grille (*gridline method*) : on avance le long d'un mur et on se décale de quelques mètres pour explorer une seconde ligne parallèle à ce mur et ainsi de suite jusqu'à couvrir toute la surface.

Pour établir les relations d'objet à objet :

- Stratégie d'objet à objet : on fait des allers-retours en ligne droite entre les différents objets.
- Stratégie périmètre à objet : on localise l'objet par rapport au mur le plus proche appartenant au périmètre.
- Stratégie du point de référence (*reference point strategy*) : elle consiste à mettre en relation un ou plusieurs objets avec un point de départ (home base), et se traduit par un changement de direction du participant lorsqu'il entre en contact avec un objet cible ou s'éloigne d'un mur de la pièce dans des directions angulaires autres que 90 degrés.
- Stratégie image mentale : on place les objets dans une forme géométrique imaginée.

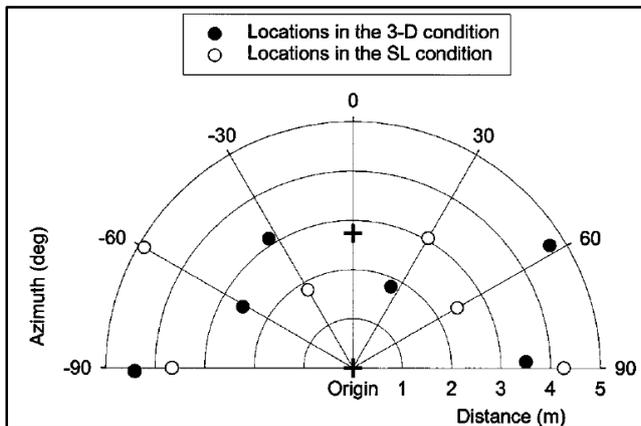
Le groupe le plus performant a utilisé plusieurs stratégies à la fois, cinq des six stratégies (à l'exclusion de la stratégie de la grille), le groupe le moins performant s'est concentré sur deux stratégies (périmètre et objet à objet). Pour conclure, les auteurs ont remarqué que les performances des personnes non-voyantes tardives et précoces n'étaient pas similaires mais n'étaient pas non plus différentes dans tous les contextes. Dans certains cas, les performances des personnes non-voyantes précoces sont meilleures que les non-voyants tardifs et inversement.

II.1.4.3 La mise à jour de la représentation spatiale lors du déplacement

Les tâches de "spatial updating" ou « mise à jour spatiale » peuvent être utilisées à partir d'une perception auditive de l'objet distant au lieu de la perception visuelle. Par exemple, Loomis et al. (2002) ont réalisé une expérience avec des personnes voyantes sous bandeau et des personnes

non-voyantes en leur présentant deux types de stimuli auditifs, comme illustré dans la figure 1.6 ci-dessous : a) une description verbale de la position de l'objet (direction horaire deux heures, quatre heures etc. et distance) ; b) un son d'un haut-parleur pour spécifier la position d'une cible. La stimulation auditive des haut-parleurs est dite "3D".

A noter que les sujets étaient familiarisés avec les stimuli avant l'expérience. Pour chaque essai, on demande au sujet de marcher jusqu'à la position de la cible de deux façons différentes : la



marche directe et la marche indirecte qui consiste à partir initialement dans une direction différente de celle de la cible, afin de mesurer la capacité de garder en mémoire la position de la cible.

Figure 1.6 (ci-contre) : Configuration spatiale des cibles utilisées par Loomis et al (2002), soit correspond à un son 3D (haut-parleur) ou bien à une description verbale.

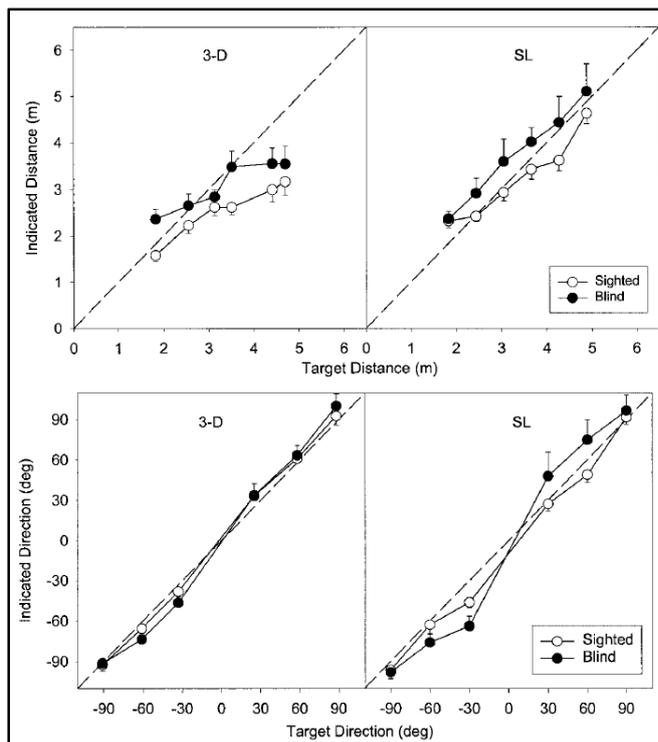


Figure 1.7 : Performance des voyants (sighted) et non-voyants (blind) dans l'étude de Loomis et al (2002)

Les résultats montrent que la performance était similaire pour les deux types de stimuli (cf. figure 1.7). Ceci montre qu'une fois que la représentation mentale de la position de la cible est indépendante du stimulus utilisé pour la localiser. Donc pour conclure, la différence de biais de la mise à jour entre le son du haut-parleur et la description verbale est minime pour les deux groupes. Ceci montre que les sujets non-voyants sont capables de mettre à jour les positions pour les deux types de stimuli auditifs utilisés dans l'expérience. Cela signifie donc que la perte de vision n'empêche pas de développer des

compétences par rapport à la mise à jour de la représentation spatiale créée par des stimuli auditifs (cf. figure 1.8).

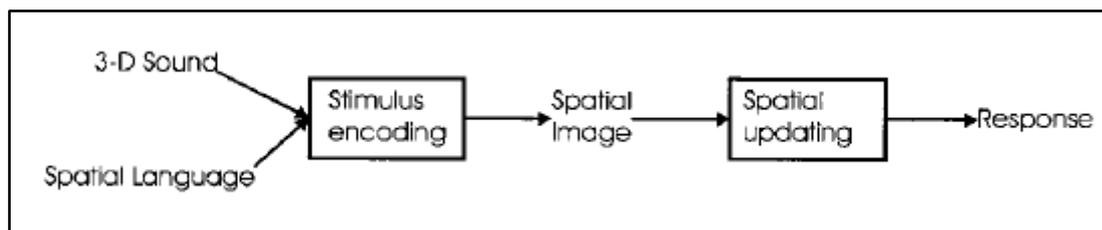


Figure 1.8 : Modèle en deux étapes d'encodage des stimuli et de mise à jour spatiale.

Warren et Pick (1970) ont expérimenté une situation de conflit spatial auditif-proprioceptif où les participants devaient pointer vers une enceinte émettant un son qui pouvait être déplacé spatialement, en la touchant (induisant un biais proprioceptif) ou pas (favorisant un biais audio). Les participants non-voyants de naissance produisaient des réponses de pointage vers des cibles fortement influencées par les informations proprioceptives, alors que l'inverse n'a pas été observé. Bien que cette tendance ait également été observée chez les participants partiellement non-voyants et les sujets voyants de contrôle sous bandeau, elle est apparue plus prononcée chez les participants non-voyants congénitaux. Ces résultats suggèrent que même une petite capacité visuelle permettrait une organisation des modalités restantes similaire à celle des personnes voyantes. Toujours, en ce qui concerne l'audition, des études ont montré que la sensibilité auditive est similaire pour la perte visuelle tardive et précoce (Starlinger and Niemeyer, 1981 ; Bross & Borenstein, 1981; Kellogg, 1962) voire meilleure que chez des personnes voyantes (Arias, Curet, Moyano, Joeques, & Blanch, 1993).

II.1.4.4. Rôle du vécu dans la représentation spatiale

Nous allons reporter certains faits rapportés par des professionnels de la rééducation en mobilité des non-voyants (Instructeurs de locomotion) qui à notre sens peuvent expliquer que chercher à analyser les différences de représentation spatiale entre des groupes de non-voyants congénitaux et acquis risque de donner des résultats aléatoires.

- Il est reconnu que le passé visuel aide à la représentation de l'espace, mais ce n'est pas forcément le facteur prédominant. En effet, le rôle du vécu en autonomie chez le non-voyant est considéré comme l'élément principal (Ratelle et Couturier, p. 18, 2019). En effet une perte de la vision associée à une longue durée sans d'autonomie, peut détruire la construction spatiale chez l'individu, jusqu'à douter de l'existence d'un passé visuel...
- Séparons tout d'abord les échelles de la construction spatiale [Schinazi, 2008] :
 - Echelle à portée de main dite « micro »,
 - Echelle à portée de regard dite « méso »
 - Echelle à portée de trajet nécessitant plusieurs points de vue pour être appréhendée dite « macro »

Pour les voyants, si on pose des questions sur une scène à portée de main ou à portée de regard, il faut aller dans les détails pour trouver des différences entre l'analyse des sujets (temps pour résoudre un jeu des sept erreurs par exemple...).

Par contre à l'échelle du trajet, si on demande par exemple de dessiner une carte d'un trajet quotidien, le taux d'erreur dans la carte d'un sujet à l'autre sera énorme. La façon

de transmettre un trajet familier à une autre personne diffère également : Certains diront « après le feu rouge prendre la première à droite faire 100 mètres puis la seconde à gauche à 300 mètres etc. » d'autres diront « après le feu rouge, tourner à droite après le panneau publicitaire, puis à gauche après le grand bâtiment blanc... ». La seconde catégorie devenue non-voyante aura beaucoup plus de difficultés en rééducation de mobilité car elle a besoin de repères visuels. L'effort cognitif pour faire une construction spatiale a souvent été décrit comme plus important chez un non-voyant congénital que lors d'une cécité acquise. Par contre, dans la durée limitée d'une expérience, cet effort cognitif peut être masqué par l'endurance cognitive de la personne, ce qui pourrait biaiser le résultat.

- Il est suggéré dans plusieurs références [Pogrud et Fazzi, 2002 ; Ratelle A. et Couturier J.-A, 2019; Sapp, W, 2011], que les expériences de déplacement des personnes jouent un rôle fondamental dans la capacité à faire des inférences au niveau de la construction spatiale.
- Il est impératif également d'avoir conscience de l'inégalité fondamentale de prise en charge en rééducation en cas de cécité précoce (à l'âge de l'enfant) et celle en cas de cécité acquise à l'âge adulte. La grande majorité des instructeurs de locomotion travaillent pour les enfants qui sont très largement minoritaires dans la population déficiente visuelle. Sachant que le vécu est essentiel dans la construction spatiale, le rôle de l'instructeur de locomotion est justement de créer du vécu de déplacement et de représentation de l'espace chez son patient. Même si le passé visuel est un vécu utile, son avantage peut être rapidement perdu par l'absence de prise en charge rééducative.

Ces différents éléments vont dans le sens des différences non significatives ou non reproductibles entre les groupes de non-voyants congénitaux ou acquis.

Par ailleurs :

- ces études se font toujours sur des cohortes faibles,
- Il semble totalement impossible de quantifier objectivement les stimulations familiales ou par la rééducation qu'un individu a pu recevoir, au niveau de l'expérience spatiale, au moment de se présenter à un test.

Ainsi même s'il y a un consensus chez les thérapeutes sur l'utilité de l'expérience visuelle dans le processus de construction spatiale chez le sujet aveugle, il est normal pour les raisons précédemment évoquées que la quantification scientifique de son rôle souffre d'un grand nombre de biais rendant sa mise en évidence hasardeuse.

S'il était possible de connaître de manière fiable le niveau et l'intensité des mises en situation et du vécu de déplacement autonome d'une personne, il serait intéressant de regarder s'il y a une corrélation entre la quantité de vécu et les capacités d'inférence spatiale. Pour tout individu la construction spatiale, base du déplacement, est un processus multi-sensoriel, l'absence de vision est une perte très importante d'information qui n'est pas compensable de manière complète par les autres sens (générant un taux d'invalidité de 85%). Nous allons nous intéresser aux expériences concernant les capacités de représentation de l'espace dans différentes configurations multi-sensorielles. L'objectif de la thèse étant d'analyser les gains en mobilité et donc en construction spatiale par une orthèse électronique (Canne Blanche Électronique).

Pick et al. (1969) ont étudié la localisation d'un objet à l'audition et à la vue chez des personnes voyantes et non-voyantes. Ils ont créé un biais artificiel entre les informations provenant des différentes modalités de perception. La résolution de ce biais était examinée pour une tâche de pointage dans les cas suivants : vision et proprioception, proprioception et audition et vision et audition. Ils ont constaté que chez les personnes voyantes la vision biaisait fortement la localisation proprioceptive et auditive, alors que l'audition ne biaise pas la localisation visuelle.

Warren (1970) a montré que la vision est fortement impliquée dans la localisation auditive chez l'adulte. Les participants inclus dans l'étude pointent les sons avec les yeux fermés ou dans l'obscurité, avec plus de précision en présence d'un environnement visuel qu'en son absence. Même si la vision ne fournissait pas une information réelle de l'emplacement du son. Ces deux références évoquent un processus hiérarchique entre les différentes modalités dans la construction spatiale, la vision ayant un rôle prédominant. Les études de Millar (1994; 2000) mettent également en évidence une repondération des entrées sensorielles au cours de l'expérience motrice pour la représentation de l'espace sans vision.

Pour faire apparaître le lien avec les pratiques thérapeutiques de rééducation (Ratelle & Couturier, 2019), le travail du rééducateur est de recréer chez l'individu, par les expériences vécues, un nouvel équilibre multi-sensoriel, une nouvelle hiérarchie entre les sens suite à la disparition du sens prédominant qu'est la vision. Par le vécu, les déficients visuels peuvent se rapprocher ou pas de l'efficacité des voyants selon l'action envisagée. Schinazi (2015) fait état de trois modèles pour montrer l'évolution des différences de performances entre voyants et non-voyants en fonction de l'expérience (cf. figure 1.9).

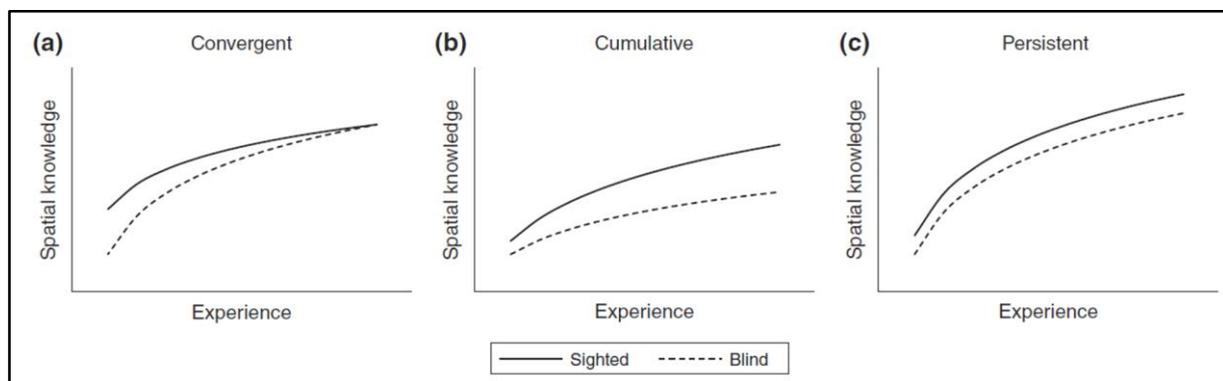


Figure 1.9 : Trois modèles de différences dans l'acquisition de connaissances spatiales entre les personnes aveugles et les personnes voyantes (d'après Schinazi, 2015). Sur l'axe des x, on trouve la quantité d'expérience avec un environnement ou une tâche particulière. L'axe des y représente l'étendue de l'acquisition des connaissances spatiales. (a) Modèle convergent : la différence entre les individus aveugles et voyants diminue avec le temps jusqu'à atteindre un niveau similaire de connaissances spatiales. (b) Modèle cumulatif : la différence entre les aveugles et les voyants augmente avec l'expérience. (c) Modèle persistant : les individus aveugles et voyants continuent d'acquérir des connaissances spatiales avec l'expérience, mais les différences de connaissances spatiales restent constantes.

Nous nous retiendrons pour notre étude les éléments suivants :

- Certaines actions sont de type « réflexe » car elles ne laissent de toute façon pas le temps de faire autrement (réagir au sol qui se dérobe sous la canne).
- La capacité d'action d'un individu est liée à sa pratique et à son expérience acquise avec le potentiel sensoriel dont il dispose.

- La qualité de cette capacité d'action est soumise à une bonne organisation du processus hiérarchique entre les différentes informations et à la pertinence de la synthèse.
- Le rôle de la rééducation est primordial pour transférer le savoir-faire collectif issu de l'expérience et de la pratique thérapeutique à un individu afin d'optimiser son processus hiérarchique de traitement et de synthèse des différentes informations sensorielles.

Résumé de la section II.1.

Les causes et les circonstances de la perte de la vue sont très diverses. Les conséquences sur la vie quotidienne sont également très variées en fonction de l'environnement psychosocial, et des possibilités de prise en charge rééducative qui sont largement insuffisantes pour les adultes.

Cette diversité de profils a provoqué de nombreux résultats contradictoires sur, par exemple, les différences de représentation de l'espace entre non-voyants congénitaux et acquis. En effet, il semble qu'il y ait de nombreux facteurs dépendant du vécu de l'individu (par ex., l'expérience de mobilité, le type de rééducation, etc), qui modulent les capacités de représentation spatiales, pas toujours bien contrôlés dans les expériences.

Toutefois les approches écologiques et cognitives des liens entre perception et action fournissent des éléments conceptuels complémentaires pour décrire la mobilité des non-voyants.

II.2. Les outils de substitution sensorielle au service de la locomotion

II.2.1 La substitution sensorielle

L'idée de base sous-jacente à la **substitution sensorielle** est la **plasticité cérébrale**. Le cerveau, ayant un sens en moins à gérer, va se réorganiser avec les sens restants pour retrouver une partie des fonctionnalités du sens manquant. Ce phénomène naturel s'appelle la « compensation » (Bach-Y-Rita P., 1996).

L'idée de la substitution sensorielle est d'insérer des codes ou des instruments pour améliorer cette compensation. Ces codes ou appareils sont appelés des dispositifs de substitution sensorielle. Nous allons voir qu'il y a **peu d'exemples** en fait **de dispositifs fonctionnels**.

II.2.1.1 Analyse de dispositifs de substitution sensorielle couramment utilisés

La substitution sensorielle consiste à fournir de l'information qui ne peut être perçue par un sens déficient en utilisant les autres sens. Cette discipline est principalement rattachée à la neurophysiologie et à la neuropsychologie. Donnons quelques exemples de dispositifs largement utilisés :

- Dans le domaine de l'audition, la langue des signes permet de traduire de manière visuelle de l'information issue du langage oral normalement transmise par voie sonore. Dans le domaine de la vision, l'écriture Braille permet de transmettre de manière tactile de l'information de la langue écrite normalement transmise de manière visuelle en gardant la même structure, car c'est un code par lettre. Cela permet aux aveugles d'avoir accès à la lecture de manière fluide.
- La canne blanche permet de transmettre l'information sur la planéité du sol qui se transmet normalement de manière visuelle. Cela permet à un aveugle d'avancer en sécurité sur un sol pouvant ne pas être plat. La transition du bâton d'aveugle à une canne longue signalétique explorant le sol de manière systématique et structurée a pris des siècles. L'usage d'une canne blanche n'a rien d'évident. Les autodidactes retrouvant les techniques optimales sont très rares. L'usage de la canne blanche reste assez peu répandu, sur 100 aveugles ou malvoyants profonds 11,8 utilisent une canne blanche. (Enquête HID, exploitation 2005).

Le chien guide entre plus dans la catégorie des accompagnants que dans celle de la substitution sensorielle, même si le chien ne fait pas tout comme l'accompagnement humain et que son maître doit rester actif. C'est toutefois une solution qui fonctionne pour le déplacement et qui couvre environ 1% de la population (Enquête HID, exploitation 2005). La part du lion est à l'accompagnant humain.

II.2.1.2 Exemples de prototypes de laboratoires

- *La transcription d'images en sons*

Le système VOICE (cf. figure 1.10) transcrit point par point le contraste d'une image noir et blanc en sons. Plusieurs codes de balayage de l'image ont été tentés ces 50 dernières années. Aucune action fonctionnelle de déplacement n'a été reportée pour ce dispositif [<https://www.seeingwithsound.com/>]. Des tests de suivi d'une ligne lumineuse au sol dans un espace noir ou de gestion des obstacles noirs sur fond blanc ont été effectués (Hsu-Lin L.Y., 2016).



Figure 1.10 : Dispositif Voice

- *Le TVSS (Tactile Vision Substitution System)*

C'est le dispositif sur lequel la communauté scientifique a le plus insisté ces 60 dernières années. Le principe de base consiste à convertir une image optique bidimensionnelle acquise par caméra en une image tactile sur la peau de plus basse résolution. Les implants rétiniens actuels se basent sur les mêmes hypothèses (Collins & Back y rita, 1973). De très nombreuses versions de cette approche ont été construites, la dernière en date est le TDU (cf. figure 1.11), dénommé aussi "brainport" constitué d'une matrice de cellules électro-tactiles placée sur la langue.



Figure 1.11 : Dernière version du TVSS de 1999, matrice de cellules électro-tactiles sur la langue, dénommée également TDU.

Les tests consistent à suivre des zones blanches (ou lignes de lumière au sol) sur fond noir au sol (Luo, Y.H.-L, 2016). Les objets sont placés à un certain endroit de la ligne de lumière et masquent la ligne pour provoquer un arrêt de la personne. Il n'y a pas d'actions de déplacement fonctionnelles de reportées. Citons une autre illustration de ce même principe en utilisant une imagerie 3D codée sur une matrice tactile développée par une équipe Russe intitulée « Kinect for the Blind » (<https://zoneos.com/kinect/>) (cf. figure 1.12).

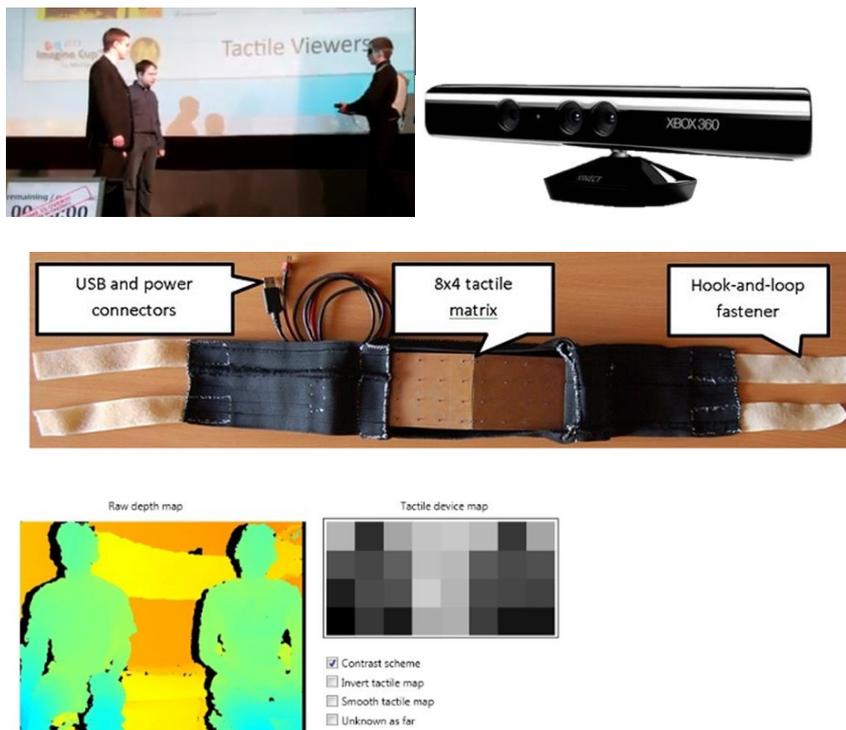


Figure 1.12: Dispositif « Kinect for the Blind »

Le dispositif obtient contrairement au Voice et TDU une information 3D réelle, non limitée au contexte de l'obstacle au sol très contrasté. Comme on peut le voir sur la vidéo (<https://zoneos.com/kinect/>) passer entre deux personnes reste une opération fastidieuse avec un dispositif encombrant. De plus, les caméras 3D ne peuvent pas fonctionner en extérieur à cause de la lumière solaire. La transmission d'information par une matrice tactile, qu'elle soit vibrante ou électrique pose un problème récurrent de faux contacts avec la peau.

- *Espaces auditifs virtuels*

Il y a de nombreuses publications sur le sujet, à notre connaissance, il y a un seul dispositif ayant pu faire des démonstrations réussies en milieu réel. Il s'agit de l'utilisation de la stéréo auditive pour créer un point virtuel dans l'espace devant soi permettant à la personne de suivre une trajectoire prédéfinie. Ceci a permis à un déficient visuel de faire le tour d'une piste de 400m en autonomie, sans s'approcher des bords (Ferrand S., 2020).

- *Reconnaissance d'objets par Intelligence Artificielle*

Citons les dernières approches basées sur l'Intelligence Artificielle. Les liens vidéos ci-dessous montrent les réalisations de Google en 2015 sur la question dans le cadre d'un vaste projet Tango, qui est aujourd'hui abandonné (cf. figure 1.13).

https://www.youtube.com/watch?v=ZhLJ8ORd_VI

<https://www.youtube.com/watch?v=refKqIPNhYo>



Figure 1.13 : Google glass

Il s'agit de la reconnaissance automatique d'objets par Intelligence Artificielle (IA). Pour le moment il n'y a pas d'usage qui en soit ressorti pour le déplacement. Les exemples restent peu convaincants (chercher une paire de ciseaux dans l'herbe etc., son chat qui ne répond pas à l'appel dans la pièce). Dans ce contexte, l'utilisateur reste passif et reçoit un flot d'informations qui n'est pas contrôlé en temps réel. Microsoft a sorti l'application sur Iphone uniquement Seeing AI, qui fait de la reconnaissance d'objets et de texte. Envision AI est une application concurrente assez similaire sur IOS et Android. Il n'y a pas actuellement d'utilisation connue pour la mobilité.

- *Utilisation d'un voyant*

L'application "By my Eyes" permet de faire appel à un bénévole voyant pour aider le déficient visuel par l'intermédiaire de la caméra de son smartphone. Cette approche est simple et peut rendre service, par contre elle n'est pas opérationnelle dans le cadre du déplacement, il est impossible de gérer la sécurité par caméra interposée, surtout quand elle est tenue de manière aléatoire. Le bénévole n'est pas forcément disponible sur de longues durées.

Il y a un certain fatalisme de la communauté des chercheurs en substitution sensorielle : tout échoue, les aveugles ne s'intéressent à rien..., la substitution sensorielle est un cuisant échec qui se répète... (Elli GV, 2014).

II.2.2. La locomotion à la canne blanche

La canne blanche est un outil de substitution sensorielle qui a fait ses preuves et qui est fonctionnel. Elle fait l'objet d'une prise en charge rééducative intitulée "instruction de locomotion". Abordons sur la base de cet exemple la notion de fonctionnalité.

II.2.2.1 La rééducation en locomotion : motivation et fonctionnalité

Une phrase revient souvent chez les rééducateurs : « N'espérez pas réussir un processus de rééducation chez un adulte en lui apprenant à faire des choses qui ne lui serviront pas dans la vie quotidienne ». Par exemple pour un non-voyant habitant à la campagne, faisant une rééducation

à Paris, cela ne sert à rien de l'ennuyer avec l'analyse des carrefours complexes typiquement parisiens, au contraire cela risque de l'inciter à abandonner sa rééducation. Pour faire une action, on choisit toujours le chemin le plus court et le plus facile. C'est ce qui nous fait choisir la ligne droite pour aller d'un point à un autre quand elle est dégagée... Un non-voyant ayant la possibilité d'être accompagné prend rarement l'initiative de faire le trajet seul.

Nous allons considérer ici qu'un dispositif fonctionnel est un dispositif qui permet de faire une action utile de façon plus efficace que tout autre moyen. Dans le domaine de la cécité, l'aide du voyant qui peut tout faire plus facilement est la voie majeure de compensation immédiate et naturelle, ne demandant aucun apprentissage. Il y a, **selon les professionnels de la rééducation**, trois situations où un non-voyant va faire une action par lui-même dans le domaine où son handicap le restreint :

- Parce qu'il l'a fait quasiment aussi bien que le voyant, sans effort additionnel notable. On peut dire dans ce cas qu'il fait usage d'un outil ou d'une stratégie très fonctionnelle pour réaliser l'action.
- Parce que l'aide du voyant n'est pas disponible et qu'il n'a que deux choix : pas faire ou faire seul, et que l'action aura un rapport intérêt/effort l'incitant à la faire. Il peut alors accepter d'utiliser un outil moyennement fonctionnel pour le faire.
- Parce que pour une raison particulière, il ne veut pas d'aide pour cette action, et que moyennant des efforts conséquents elle sera toutefois possible. Il peut alors accepter de la faire avec un outil peu fonctionnel, mais il s'agit plutôt de situations d'exceptions.

En gros, pour définir une action fonctionnelle, on pourra se référer à la notion de tiers temps (Droits et Assurances, 2016). Si une personne met 30% d'effort en temps ou énergie en plus que la moyenne de la population pour réaliser une action, on considérera cela comme fonctionnel, socialement acceptable et utilisable en pratique. Si le temps ou les efforts sont plus que doublés on rentre alors dans le peu fonctionnel.

- Exemples

Reprenons l'exemple historique du Braille, avant 1860 il y avait des livres en très gros caractères en relief pour les non-voyants. Aucun non-voyant ne pouvait lire de manière fluide, le processus de reconnaissance des caractères étant trop lent. Il en va de même actuellement pour les prothèses de rétine, reconnaître un caractère prend beaucoup trop de temps pour que la lecture puisse avoir une utilité. Le Braille s'est imposé car c'était le seul moyen à l'époque de lire de manière fluide de manière autonome, autrement qu'en se faisant faire la lecture par une tierce personne. Les machines actuelles qui font la lecture comme une tierce personne font une sérieuse concurrence au Braille qui demande plus d'efforts cognitifs (Jiménez, 2009) (Fédération des aveugles en France).

Un non-voyant se déplaçant mal et donnant la sensation d'être perdu ou en danger sera « harcelé » par les voyants jusqu'à ce qu'il accepte de l'aide. Donc si vous voulez faire une action par substitution sensorielle, faute de pouvoir la faire de manière totalement « normale » il faudra être suffisamment performant pour que la société vous laisse la pratiquer.

Un dispositif d'intelligence artificielle sur smartphone pouvant lire du texte sur l'emballage d'un produit à partir d'une photo ou d'une vidéo a un objectif de fonctionnalité, qui sera plus ou moins efficace selon le temps que l'on va passer à le mettre en œuvre et le nombre de fois que l'on devra recommencer pour avoir l'information recherchée.

Une canne électronique permettant d'éviter les collisions sur un trajet a un objectif fonctionnel, qui sera plus ou moins efficace en fonction du taux de collisions évitées de la vitesse de marche et de l'effort cognitif à mettre en œuvre pour les éviter.

Le caractère fonctionnel de la canne blanche est facile à expliciter. Si une personne veut sortir seule de chez elle sans chuter, elle a deux solutions : connaître par cœur de manière millimétrée son environnement (ce qui peut être possible dans son jardin) ou utiliser une canne blanche qui sécurise l'état du sol avant de poser le pied. La canne blanche n'élimine pas tous les accidents, les obstacles en hauteur comme les haillons de camion ne sont pas évités par exemple, mais sont moins fréquents que les dénivelés du sol qui eux peuvent être gérés avec la canne. Le temps pour faire un trajet quotidien à la canne blanche pour un bon utilisateur rentre dans le cadre du tiers temps.

II.2.2.2 La canne blanche et son utilisation en locomotion

Nous avons vu au paragraphe précédent (II.2.1.1) que seulement une faible partie de la population non-voyante utilise la canne blanche comme outil de déplacement. Cela signifie-t-il que l'outil n'est pas fonctionnel pour l'essentiel de la population ? Remarquons tout d'abord que parmi les non-voyants il y a des personnes en fin de vie ayant beaucoup d'autres handicaps et dont l'autonomie des déplacements n'est pas envisageable. D'autre part savoir assurer la sécurité du pied que l'on va poser au sol grâce à la canne n'est pas suffisant pour pouvoir se déplacer de manière autonome. Il faut savoir utiliser l'ensemble de ses possibilités sensorielles pour s'orienter dans l'espace, connaître les règles non-visuelles de circulation, exploiter les informations sonores de l'environnement, développer une représentation spatiale et surtout avoir un minimum d'expérience (Ratelle & Couturier, 2019; Guth, et al, Chapter 1, 2010).

Donnons quelques exemples de compétences motrices et basiques en locomotion à acquérir (Ratelle A., Couturier J.A., 2019) :

- Savoir balayer la canne blanche selon la technique optimisée (dite aussi académique);
- Canne de longueur adaptée à la personne (longueur égale à la hauteur du sternum);
- Prise en main, pouce orienté vers le ciel et index le long de la canne, le mouvement se fait uniquement par flexion extension du poignet en proscrivant toute pronation ou supination. La main doit être tenue au centre du corps au niveau du nombril ;
- L'extrémité de la canne est maintenue en contact permanent avec le sol grâce à un embout roulant ;
- Le balayage doit être symétrique devant ses pieds avec une amplitude égale à la largeur de ses épaules pour l'extrémité de la canne, et en opposition de phase avec l'avancée des pieds (lorsque le pied droit avance, la canne part à gauche) ;
- Être capable de marcher dans l'axe d'un trottoir en se référant à la trajectoire sonore des automobiles ;

- Savoir se servir de l'écholocation et correctement l'interpréter pour bien se placer dans un trottoir et garder ses distances au mur. (Arias, 1996) ;
- Être capable à une intersection inconnue d'analyser de manière sonore sa structure : voies à sens unique ou à double sens, nombre et directions des voies, etc. ;
- Savoir à quel moment traverser et identifier correctement ce moment : au démarrage des voitures allant dans le sens de la traversée ;
- Être conscient des cas qui ne sont pas traversables en sécurité en fonction de ses capacités, notamment auditives, et savoir à ce moment demander de l'aide ;
- Savoir ne pas écouter les indications de passants ou d'automobilistes s'arrêtant pouvant mener à des situations dangereuses ;
- Savoir prendre les transports en commun ;
- Être capable de faire le tour d'un pâté de maison au nombre de côtés inconnus et de retrouver son point de départ, et d'expliquer sa forme géométrique ;
- Savoir de quel côté du trottoir chercher son passage, et ne pas se retrouver par inadvertance sur la route à l'occasion d'une descente de trottoir ;
- Ne pas perdre sa trajectoire en se laissant entraîner par les pentes ;
- Être capable de faire un trajet inconnu par indication (1ère à droite puis seconde à gauche etc.) et de traverser au moment opportun pour se placer sur le bon côté du trottoir (côté droite quand l'on doit tourner à droite), etc.

Il ne s'agit pas ici de faire un inventaire exhaustif des techniques de locomotion à la canne, même si ces dernières sont peu décrites. La rareté des écrits dans ce domaine a pour but d'éviter les "formations sauvages" à ces techniques par des personnes non diplômées qui peuvent être dangereuses si elles sont mal faites. Il y a une profession pour l'enseignement de ces techniques : "instructeur de locomotion", qui demande un an de spécialisation après une licence professionnelle de rééducateur au sens large : ergothérapeute, psychomotricien, éducateur spécialisé, kinésithérapeute, infirmier, comme expliqué dans la partie (II.1.3). La rééducation en locomotion du déficient visuel demande en moyenne une cinquantaine d'heures de cours individuels, associés à une pratique quotidienne... Il s'agit de réorganiser les informations sensorielles, de travailler la représentation spatiale, et d'en faire une synthèse fonctionnelle afin de prendre les bonnes décisions motrices permettant d'aller en sécurité d'un point à un autre (Long R. et Giudice N., 2010). En pratique les capacités de déplacements à la canne blanche des non-voyants sont très individus dépendantes pour plusieurs raisons :

- L'accès à la rééducation en locomotion pour les adultes est très déficitaire dans tous les pays, beaucoup apprennent sur le tas.
- La technique de déplacement autonome sans vision est complexe et demande de vaincre des peurs légitimes.

Cette diversité peut être illustrée en analysant la variabilité de la technique de balayage de la canne d'un individu à l'autre (même si la technique de balayage de la canne n'est qu'une toute petite partie des acquis de la locomotion). Kim Y. (2016) ont placé divers capteurs sur la canne (accéléromètres) et dans l'environnement (caméras) pour analyser le mouvement de la canne sur un échantillon d'utilisateurs de canne blanche. Les paramètres mesurés ont été :

- la prise en main de la poignée

- La vitesse de balayage
- l'amplitude du balayage, sa symétrie
- l'inclinaison de la canne, la rotation du poignet autour de l'axe de la canne etc.

Les résultats ont montré une très grande variabilité inter-sujets et une bonne reproductibilité intra sujets. La technique académique de balayage de la canne qui a été décrite en début de paragraphe est loin d'être respectée en pratique par la majorité des utilisateurs.

II.2.3. Les cannes électroniques et leurs tests de validation

II. 2.3.1 Exemples non exhaustifs de modèles commercialisés

Les cannes électroniques sont des appareils mesurant la distance aux obstacles pouvant être utilisés seuls dans des intérieurs ou en complément de la canne blanche en extérieur. Pour les dispositifs portés en médaillons, ils sont principalement destinés à protéger la hauteur. Citons le "Ultrabodyguard" (Allemagne) (Mândru, 2007), télémètre à ultrasons représenté à la figure 1.14.



Figure 1.14 : Dispositif de torse à ultrasons

Pour les dispositifs tenus en main destinés à explorer un intérieur ou à compléter la canne classique citons le Miniguide ou la Palm sonar qui sont des dispositifs à ultrasons. Miniguide (Australie) à gauche (Roentgen et al, 2012) et Palmsonar (Angleterre) à droite (Piyush et al, 2017) (cf. figure 1.15).



Figure 1.15 : Dispositifs à ultrasons tenus à la main

Concernant les cannes, modèles ayant été les plus proposés, citons quelques exemples non exhaustifs de dispositifs à ultrasons : Ultracanne Anglaise à gauche (Penrod., 2005), Isonic : Corée au milieu (Zhao, 2005) et Ksonar : Nouvelle Zélande à droite (Antoun, 2010) (cf. figure 1.16).



Figure 1.16 : Dispositifs à ultrasons solidaires de la canne blanche

Les cannes à base de capteur optiques sont plus rares citons la “Laser Cane” la plus ancienne et plus récemment le Vistac spécialisé sur la détection en hauteur illustré dans les figures 1.17 et 1.18.

1964-1992 : Laser Cane



Figure 1.17 : Laser canne

Vistac (Allemagne)



Figure 1.18 : Vistac

Il s’agit d’un dispositif à temps de vol, il propose uniquement une détection en hauteur avec 1 mètre d’anticipation. (<https://www.vistac.de>).

A notre connaissance, les évaluations sur les dispositifs commerciaux sont rares, nous avons surtout trouvé des études de performance sur les dispositifs de laboratoire.

II. 2.3.2 Évaluation de performances de dispositifs

Nous nous restreindrons ici aux études les plus détaillées sur des dispositifs associés à une canne blanche, ayant un contact au sol. Nous ne présenterons pas les dispositifs tenus à la main sans canne et n’offrant pas de moyens mécaniques de contrôler la planéité du sol. Nous ne rapporterons pas non plus les articles présentant des résultats de performance sans description des protocoles de mesure.

Études portant sur l’évaluation des capteurs

Il s’agit dans ce type d’étude d’analyser les caractéristiques de la détection d’obstacles sous différentes conditions ambiantes. Ces études sont en général faites avec des voyants sous bandeau, avec des protocoles qui cherchent à réduire l’influence du comportement de

l'utilisateur. Par exemple, dans l'article (Pyun, 2013) les auteurs ont réalisé une canne électronique avec deux types de capteurs : ultrasons et infrarouges. Trois capteurs ultrasons : un pointant en hauteur pour protéger la tête, le deuxième pointant légèrement vers le haut pour protéger la poitrine, le troisième pointant légèrement vers le bas pour protéger les jambes, le capteur infrarouge étant dirigé vers le sol pour détecter les dénivelés. Le retour de l'information lors de la détection d'un obstacle est communiqué par deux voies : une vibration pour informer l'utilisateur de la distance à l'obstacle et un retour auditif pour lui demander de s'arrêter. Ils ont recruté cinq voyants sous bandeaux pour mesurer le temps de réaction de l'utilisateur au retour haptique : temps écoulé entre la détection d'un obstacle par le capteur et la réaction de l'utilisateur au retour. Le temps moyen a été de 410ms. De même, ils ont recruté huit voyants sous bandeaux pour évaluer la fiabilité de la détection de chute. Il a été demandé d'effectuer dix essais d'approche d'une descente, d'escaliers, en marchant le long d'une ligne droite dans deux conditions : avec et sans mouvements de balayage de la canne. Les sujets ont été invités à s'arrêter lorsqu'ils ont reçu le retour haptique accompagné par un bip sonore. La distance entre la pointe de la canne et la bordure du dénivelé a été mesurée. Lors des essais de marche sans balayage, les sujets ont été autorisés à se déplacer d'avant en arrière pour trouver la position exacte de détection du dénivelé. La distance entre le bout de la canne et les escaliers est de 1.02 mètres sans balayer la canne. Avec balayage de la canne cette distance se réduit à 0.83 mètres. Les inconvénients du capteur infrarouge sont les faux positifs sur les surfaces réfléchissantes, ainsi que les perturbations en temps ensoleillé. Le champ trop large des capteurs à ultrasons a été également relevé, donnant de nombreux faux positifs dans les zones étroites.

Etudes sur trajets contrôlés

Certaines études cherchent à caractériser le comportement de l'ensemble appareil plus utilisateur sur des trajets contrôlés afin de pouvoir faire des mesures objectives analysables statistiquement. Par exemple, Dos Santos et al. (2020) ont comparé les performances locomotrices à la canne blanche simple et à leur prototype de canne électronique (cf. figure 1.19). Les sujets voyants et non-voyants participant au test sont naïfs (pas d'utilisation de la canne électronique pour les non-voyants, pas d'utilisation de canne électronique ou simple pour les voyants). Le dispositif à ultrasons placé sur la canne détecte les obstacles au-dessus de la taille avec une portée de 1.5 mètre dans un champ de 30 degrés. Le retour de l'information se fait de manière vibrotactile dans la main à l'aide d'un micro-moteur ou par voie sonore. Dans ce papier les auteurs ont réalisé deux expériences : la première uniquement avec des voyants sous-bandeau, la deuxième avec des voyants sous bandeau et des non-voyants. Ils ont donné à chaque participant voyant cinq minutes pour se familiariser avec les outils. Des tests de marche sur un chemin de 21m x 2,5m étaient réalisés avec des obstacles artificiels dont deux obstacles suspendus du plafond et cinq posés sur le sol. Une bande tactile est posée au sol pour les aider à garder une ligne droite. Les résultats ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre le type de la canne, ni entre les deux groupes des tests (voyants et non-voyants) pour la détection des obstacles au niveau du sol. Par contre 79% des obstacles en hauteur ont été détectés avec la canne électronique qui ne présente un avantage que sur ce point. Les vitesses de marche moyennes relevées dans le trajet avec obstacles ont été les suivantes à la canne simple : non-

voyants 0.4m/s, voyants sous bandeau 0.26 m/s, à la canne électronique : non-voyants 0.33 m/s, voyants sous bandeau 0.2m/s.

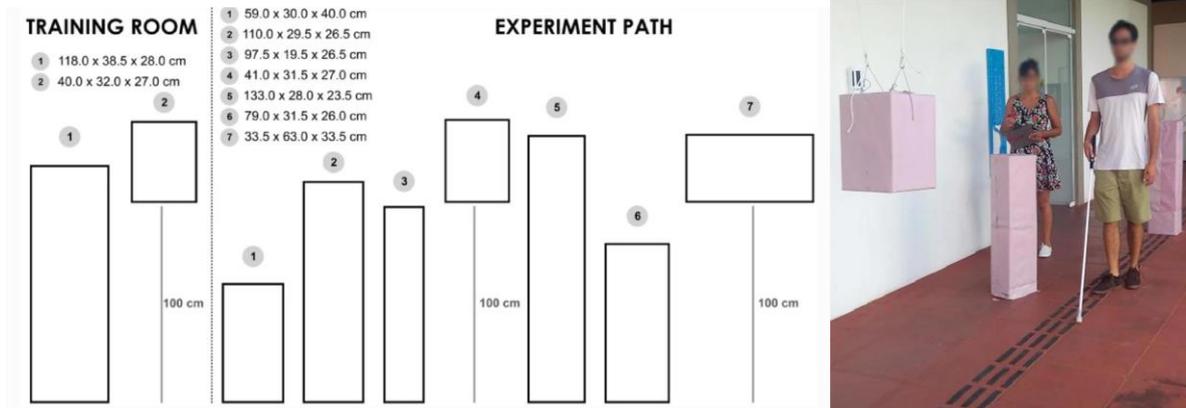
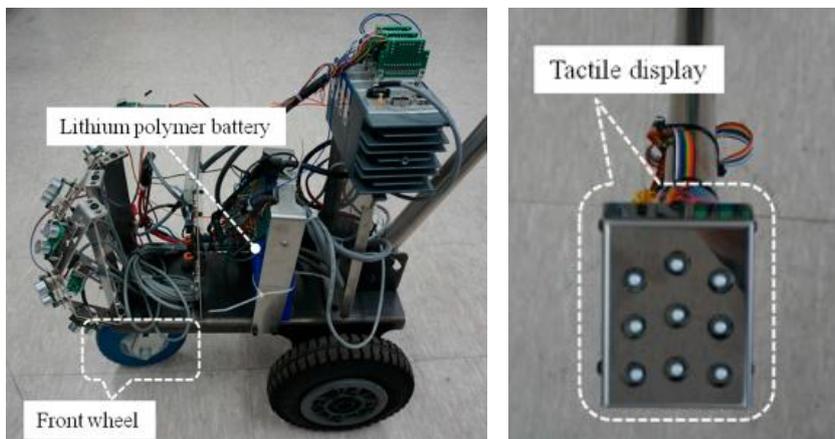


Figure 1.19 : A gauche : exemple d’obstacles utilisés par Dos Santos et al. (2020), dans la phase d’entraînement et dans la phase expérimentale. A droite : illustration d’un essai expérimental.

Jeong et Yu (2016) ont développé une canne électronique constituée d’un plateau à trois roues avec freinage électromagnétique poussé par la canne et sept capteurs à ultrasons placés sur le plateau pour détecter les obstacles. L’information est transférée via une vibration tactile transmise à la main de l’utilisateur (cf. figure 1.20). Ils ont réalisé trois parcours de test avec la canne électronique avec des personnes aveugles pour tester l’efficacité et la détectabilité. Les participants non-voyants sont des utilisateurs de la canne blanche au quotidien mais découvrent l’outil pour la première fois. Le trajet est un chemin en ligne droite contenant des obstacles (cf. figure 1.21). Il y a quatre sujets non-voyants (mis sous bandeau pour éviter les effets éventuels d’un reste visuel). Le parcours est répété plusieurs fois avec un changement de position des obstacles.



Le taux d’évitement des obstacles a été de l’ordre de 90% mais avec une vitesse moyenne de déplacement de 0,23 m/s qui n’est pas fonctionnelle. A noter que, les auteurs n’ont pas réalisé un test pour vérifier si les capteurs fonctionnent bien à l’intérieur comme à l’extérieur (pluie, humidité, etc.).

Figure 1.20 : Plateau 3 roues avec capteurs à ultrasons et système de freinage électromagnétique utilisé par Jeong et Yu (2016).

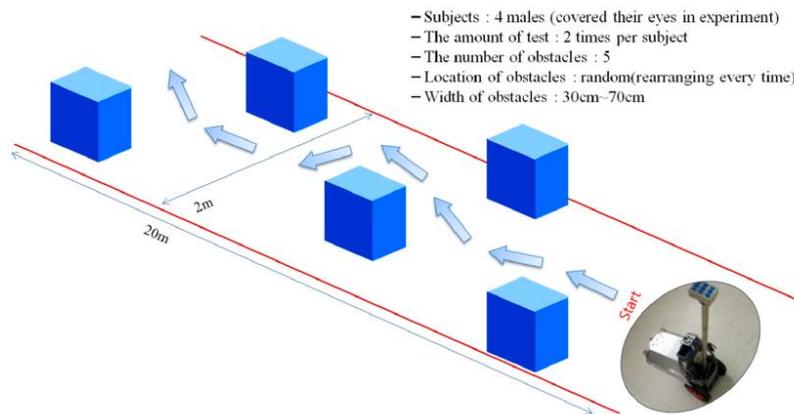
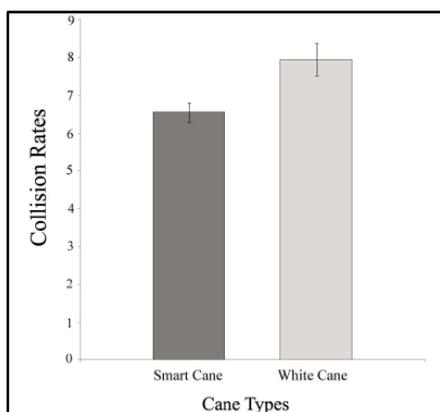


Figure 1.21 : Chemin expérimental à traverser dans l'étude de Jeong et Yu (2016).

Kim and Cho (2013), ont réalisé une étude comparative en faisant des tests entre une canne électronique fabriquée par les auteurs et la canne blanche classique. Le prototype était réalisé avec des capteurs à ultrasons. La communication de l'information lors de la détection des obstacles se fait par vibrations pour générer des alertes sur la poignée de l'utilisateur. Ils ont recruté des personnes déficientes visuelles n'ayant pas d'expérience des cannes électroniques. Le groupe de 20 personnes contenait 14 utilisateurs de cannes blanches au quotidien et six non utilisateurs de la canne. Les sujets ont eu un temps, non précisé, pour se familiariser avec l'outil en intérieur en utilisant des obstacles artificiels. Le trajet faisait 20,5 m de long sur trois mètres de large. Deux obstacles sur les quatorze au total sont suspendus du plafond. Les paramètres de mesures sont : la vitesse de marche et le nombre des collisions avec les obstacles. Les résultats ont montré une absence de différence de temps de trajet significative entre la canne simple et la canne électronique. Notons que le temps mis en moyenne de 67 secondes pour 20,5 mètres de



trajet est extrêmement lent, cela correspond à 0.3m/s soit le tiers d'une vitesse de marche normale. Pour le taux de collisions, celui de la canne électronique est légèrement inférieur (de l'ordre d'une collision et demie en moins, en moyenne), mais de manière significative, à celui de la canne blanche (cf. figure 1.22). Une interview de satisfaction indique que la majorité des participants ont signalé que l'outil est utile mais pas évident sans avoir une formation.

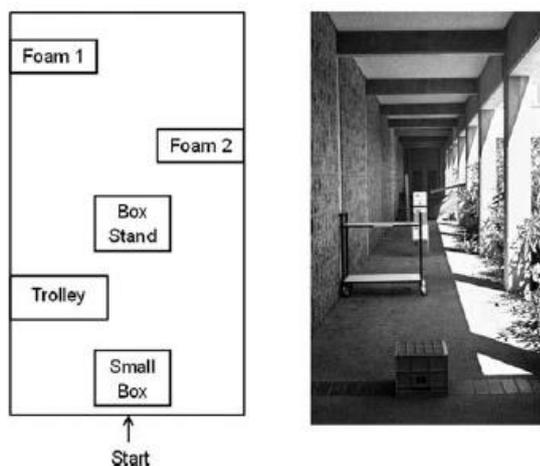
Figure 1.22 (ci-contre) : Taux de collision comparant la canne électronique et la canne blanche, dans l'étude de Kim and Cho (2013).

Izzatdin et al (2008) ont réalisé un prototype d'une canne électronique en utilisant des capteurs ultrasons pour détecter les obstacles. Le retour de l'information est auditif grâce à un 'Buzzer'. L'outil pèse 1.2 kg, équipé par une bandoulière pour alléger le poids. Ils ont concentré leur analyse sur la détectabilité des objets dans différentes conditions : objets en déplacements, fixes, situés entre 0.1 et un mètre, conditions de pluie etc. malheureusement les protocoles de prises de mesures ne sont pas décrits dans l'article par les 30 sujets sous bandeaux ce qui rend les résultats fournis difficilement interprétables. Par contre, pour évaluer la distance de détection d'un mur

suivant l'angle d'approche, le protocole est explicite. Il montre une chute de la portée du capteur (plus d'un facteur quatre) lorsque l'angle passe de 20 à 40°. C'est une limitation connue des ultrasons qui se réfléchissent totalement sur un mur lisse lorsque l'angle dépasse 40%.

L'outil « iSonar » fonctionne à l'aide des capteurs ultrasons fixés sur la canne pour éviter les obstacles, avec un retour vibrant (Vorapatratorn & Nambunmee, 2014). Ensuite, ils ont réalisé des tests avec quinze non-voyants (six femmes et neuf hommes) recrutés à la base de volontariat de l'association thaïlandaise des aveugles. A noter que les participants n'ont jamais utilisé l'outil avant, ils ont donc prévu un créneau d'explication et de familiarisation. Chaque participant a participé à deux expériences : avec canne blanche standard et canne blanche et iSonar. Le parcours du test faisait 12 m de long et deux mètres de large et contenait cinq obstacles. Les obstacles étaient placés selon plusieurs niveaux : au niveau de la tête, de la poitrine, au-dessus de la taille, au-dessous de la taille et au niveau des jambes. Leurs positions étaient changées aléatoirement à chaque passage. Ils ont mesuré un taux de collision réduit de 33,3% à la canne seule à 6,67% avec le Isonar pour les obstacles plus hauts que la taille. Il n'y a pas eu de différence significative de temps de trajet de relevée. Ils envisagent, prochainement, de tester le dispositif dans différentes conditions de températures et d'humidité parce que les ultrasons sont sensibles à ces deux paramètres est sensible à la température. Des essais à long terme sont également annoncés pour voir les effets secondaires de l'usage du capteur.

O'Brien et al (2014) ont développé une canne électronique avec un capteur à ultrasons pour détecter les obstacles via des vibrations dans la paume de la main de l'utilisateur. Le capteur est situé sur la poignée de la canne et dirigé vers le haut afin de couvrir la partie supérieure de l'utilisateur. Pour tester l'outil, ils ont recruté seize voyants sous bandeaux. Le trajet fait 21.2 m de long et 2m de large, avec cinq obstacles différents (cf. figure 1.23). Les obstacles étaient placés aléatoirement et changés à chaque passage. L'ordre de passage a été mélangé pour ne pas avoir un effet. Les utilisateurs sont sous bandeau sans avoir le droit de voir le passage avant le test. Pour se familiariser avec l'outil, un autre trajet d'entraînement a été conçu. Les résultats statistiques montrent que le temps parcouru avec les deux outils ne sont pas significativement différents, de même pour le nombre des collisions des obstacles. Tandis que les résultats subjectifs des participants montrent que certains ont trouvé qu'ils ont touché moins d'obstacles qu'avec la canne. Aussi, certains participants trouvent que l'outil est plus facile et utile que la canne blanche et d'autres non.



qu'avec la canne. Aussi, certains participants trouvent que l'outil est plus facile et utile que la canne blanche et d'autres non.

Figure 1.23 : trajet utilisé pour évaluer la canne à ultrasons dans l'étude de O'Brien (2014)

Etudes sur questionnaires de satisfaction en contexte expérimental

D'autres études ont analysé le ressenti de l'utilisateur en mettant un outil à disposition du participant pendant une période de temps (jours ou semaines) pour le tester. Par la suite, ils sont interviewés par le biais d'un questionnaire. Commençons par l'étude de Kiuru et al (2018) qui utilise un Mini-radar à ondes millimétriques porté au niveau du torse. Le champ du radar est de 25° horizontalement et 70° verticalement, le retour d'information à l'utilisateur est fait par vibrations. Les propriétés précises du capteur ne sont pas décrites, hormis le fait qu'il est destiné aux extérieurs, les espaces encombrés donnant trop de signaux parasites par rebond (cd. figure 1.24). Les auteurs ont recruté 25 participants pour participer aux tests, dont quatorze d'entre eux étaient des aveugles, sept avaient une basse de vision y compris une cécité nocturne ou une vision en tunnel, et quatre étaient sourds-aveugles. Ils ont eu l'outil pendant deux semaines, après avoir fait une courte marche avec chaque participant pour vérifier s'ils ont bien acquis les notions de base d'utilisation de l'outil. A la fin des deux semaines, ils ont fait remplir un formulaire de satisfaction, en demandant si l'outil améliorait leur perception environnementale d'une manière significative ou pas. Avec une échelle de un à cinq : pas du tout (1), pas beaucoup (2), dans certaines mesures (3), significatif (4), très significatif (5). Pour les conditions suivantes : la dimension de l'outil, le poids, la facilité d'ajuster et d'utiliser, la sécurité, la durabilité, le confort et l'efficacité. Le score moyen est de 3.8 avec un écart type de 0.4. On peut regretter que l'étude ne permette pas de connaître le type de trajet ou d'environnement rencontré par les utilisateurs.

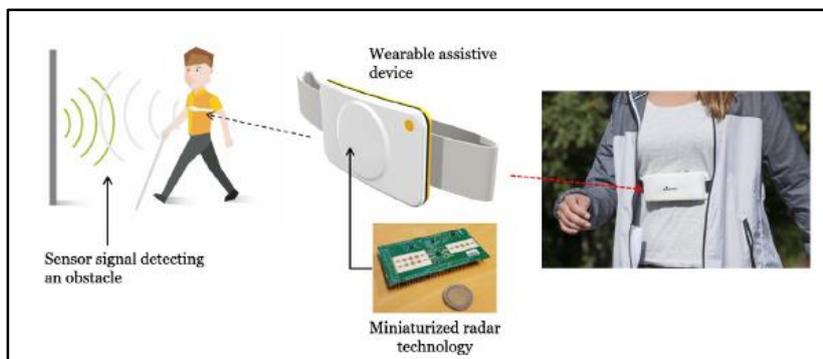


Figure 1.24 : des images extraites du papier (Kiuru et al., 2018) pour illustrer le dispositif.

Pour la référence (Ramirez et al, 2012), les auteurs ont conçu une canne électronique à base d'ultrasons pour détecter les obstacles en hauteur car la canne blanche longue ne protège des obstacles qu'en dessous de la taille. Le retour de l'information est fait par voie tactile et sonore. Les tests ont été réalisés avec sept non-voyants pour le prototype un sur une période de trois mois et avec 17 non-voyants pour le deuxième prototype sur une période de deux mois. Les trajets étaient contrôlés dans des endroits aménagés et répétés plusieurs fois dans des conditions climatiques différentes. Par la suite y a eu une interview avec chaque participant autour d'un questionnaire sur les deux prototypes. La synthèse du questionnaire a fait ressortir les points positifs suivants : la détection des obstacles est précise au-dessus de la taille, satisfaction pour la conception ergonomique et l'utilisation de l'appareil, l'outil ajoute des informations spatiales à la canne. Et les suggestions d'améliorations sont : avoir une poignée plus petite pour permettre une plus grande portabilité, ajouter un interrupteur pour le choix son/vibration, résoudre les vibrations excessives déclenchées par les flux de piétons, déplacer la position du retour tactile et adapter le prix aux

autres appareils similaires. Le taux global de d'acceptation a été annoncé à 80%. Des essais plus long terme ont été menés par la suite par Hersh et García Ramírez (2018) avec 3 non-voyants et deux mal-voyants. Un utilisateur non-voyant avait six mois d'expérience avec l'outil et un mal-voyant quatre mois. Pendant le test les participants ont été guidés et positionnés par des instructeurs de locomotion. L'instructeur positionne le participant dans la direction de l'obstacle sans donner d'informations sur ce dernier (distance, type, etc.). Le participant doit s'arrêter dès que l'appareil détecte l'obstacle, puis le signaler afin de mesurer la distance entre le participant et l'obstacle. L'opération est répétée plusieurs fois en le positionnant en face à l'obstacle sous différents angles. A la fin, un questionnaire a été demandé à chaque participant individuellement. Les résultats du test ont montré que les cinq utilisateurs marchent plus lentement avec le dispositif. Les auteurs pensent que le nombre des participants est insuffisant pour affirmer une corrélation entre la vitesse et la canne. Les résultats ont également montré que la canne a réussi à détecter et éviter les obstacles (à l'exception des poteaux fins). Les utilisateurs ont signalé certains défauts dans l'outil : Ne fonctionne pas lorsqu'il pleut, ne détecte pas les obstacles dans des endroits encombrants, le son de l'appareil est trop fort, le temps de réponse du capteur est lent, ce qui empêche d'anticiper et contourner les obstacles sans contact.

Etude avec des utilisateurs expérimentés à la canne électronique en situation réelle

L'étude a été réalisée en 2005 par des membres de l'équipe du laboratoire Aimé Cotton à l'origine de la canne électronique que nous allons étudier (Damaschini, R. et al, 2005). Elle a inclus 16 sujets entre 23 et 62 ans, neuf de catégorie quatre et sept de catégorie cinq selon la classification de l'OMS. Les non-voyants utilisaient leur outil quotidien qui était soit le Tom Pouce I, soit le Télétact II. Ils réalisaient deux trajets, l'un de 200m en centre commercial, l'autre de 500m en extérieur dans les rues parisiennes. Il y avait deux trajets de chaque type considérés de difficulté équivalente, l'un pour être réalisé à la canne seule, l'autre avec une canne électronique. Les indications pour réaliser le trajet étaient données par des instructeurs de locomotion (prendre la première route à droite puis la seconde à gauche par exemple...). Plusieurs évaluateurs dont des instructeurs de locomotion notaient de zéro à trois : la qualité de l'anticipation et la qualité de la trajectoire. La fréquence des collisions était évaluée de zéro à deux. Il a été observé une amélioration significative de la note d'anticipation, de qualité des trajectoires ainsi que du taux de collision. Cette étude a permis de constater des bénéfices cliniques, par contre il était difficile de remonter aux causes des difficultés de certains utilisateurs. En effet la locomotion en situation réelle est très multi-sensorielle, dépend également de l'expérience du sujet dans des conditions similaires, de son analyse auditive etc. Les situations réelles sont scientifiquement non reproductibles (un même trajet peut être simple ou compliqué selon le comportement de certains passants, la forme que prend la circulation etc.), et il est très compliqué d'avoir une vraie équivalence des conditions. Avec toutes les variabilités des conditions et le nombre importants de paramètres, il était difficile de savoir si la cause d'un défaut d'anticipation ou une collision pouvait être due à un défaut du dispositif, à une déconcentration causée par le milieu extérieur, ou à une représentation spatiale insuffisante du sujet... (cf. figure 1.25).

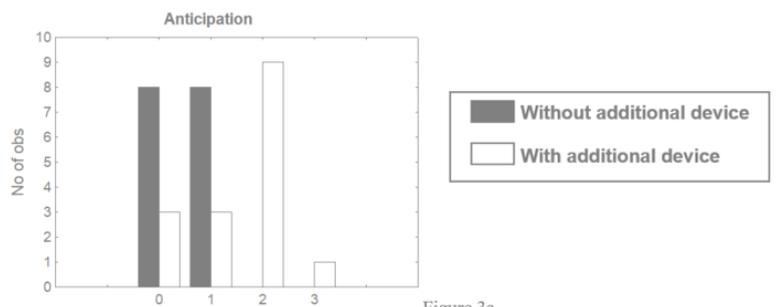


Figure 3a

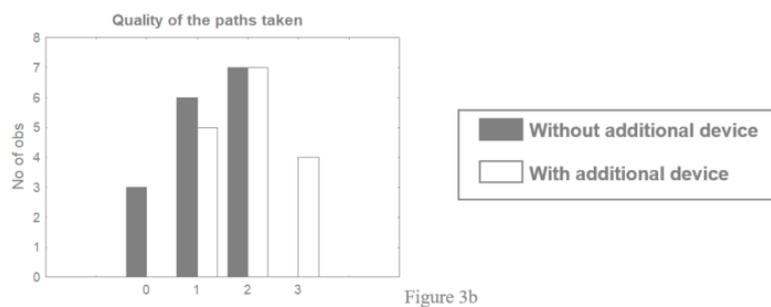


Figure 3b

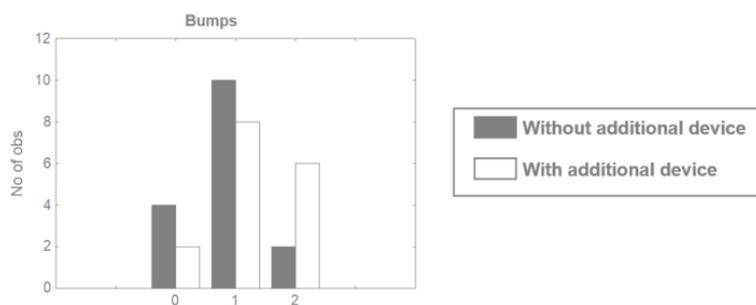


Figure 4

Figure 1.25 : Résultats présentés dans Damaschini et al. (2005).

II. 2.3.3. La canne électronique « Tom Pouce III » : Description et utilisation

Présentation du dispositif

Le Tom Pouce III est l'aide technologique qui va être utilisée dans ce travail, elle sera pour cela décrite en détails. Son rôle est de faciliter la mobilité et l'autonomie des personnes déficientes visuelles. Il s'agit d'un boîtier amovible, de 160 grammes, qui se fixe sur une canne blanche. Ce dispositif a comme objectif d'améliorer et sécuriser les trajets des utilisateurs en détectant les obstacles à des distances allant de 0 à 12m, pour pouvoir les anticiper afin de les éviter.

Une formation de 35 heures est délivrée pour chaque participant par un instructeur de locomotion. Cette formation consiste à :

- Vérifier les acquis en locomotion à la canne simple, et compléter les lacunes si nécessaire.
- Faire une prise en main des fonctionnalités de la canne dans des espaces simples et sécurisés.
- Intégrer ensuite ce fonctionnement dans des environnements complexes et circulant en faisant une synthèse multi sensorielle et en développant sa représentation spatiale.

- Vérifier l'intégration des acquis et son maintien par des suivis réguliers sur plusieurs années.

Le boîtier de la canne électronique contient deux batteries AAA et est rechargeable par un câble USB, il. Il protège devant la personne par un télémètre laser rouge et deux proximateurs infrarouges l'un horizontal vers l'avant et l'autre pointant à 45° vers le haut. Le retour d'information se fait par un vibreur dans la paume de la main, comme le montre la figure 1.26 ci-dessous.

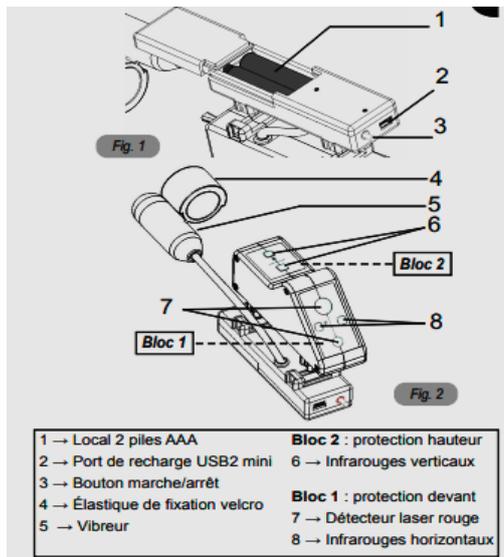


Figure 1.26 : Schéma du boîtier Tom Pouce (documentation fabricant VISIOPTRONIC).

Ensuite l'utilisateur dispose d'un commutateur trois positions en haut du boîtier pour la sélection des portées : deux mètres, quatre mètres et six mètres, comme le montre figure 1.27 ci-dessous :

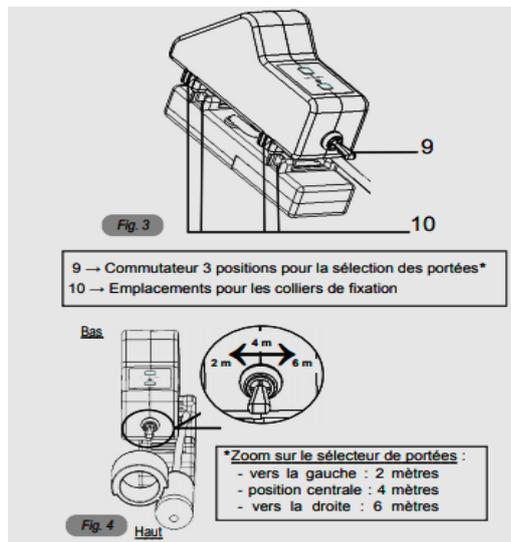


Figure 1.27 : schéma du haut du boîtier Tom Pouce (documentation fabricant VISIOPTRONIC).

Deux schémas explicatifs (cf. figures 1.28 et 1.29) montrent les champs des trois différentes portées en vue du dessus et latérale.

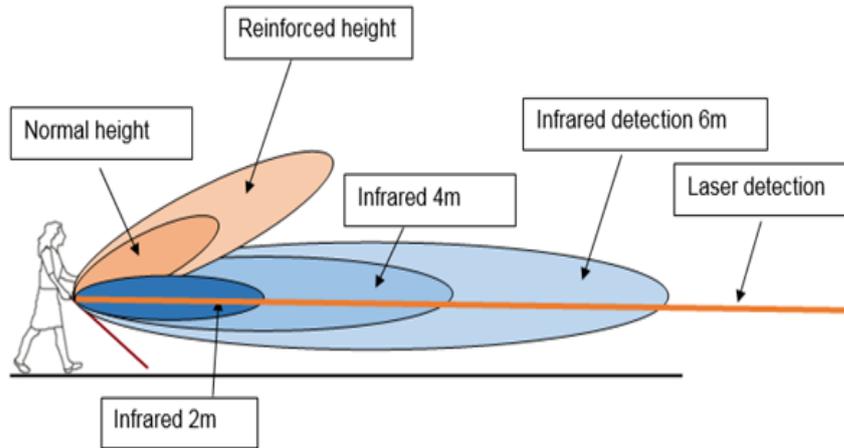


Figure 1.28 : Les champs des trois portées avec protection en hauteur, vue latérale.

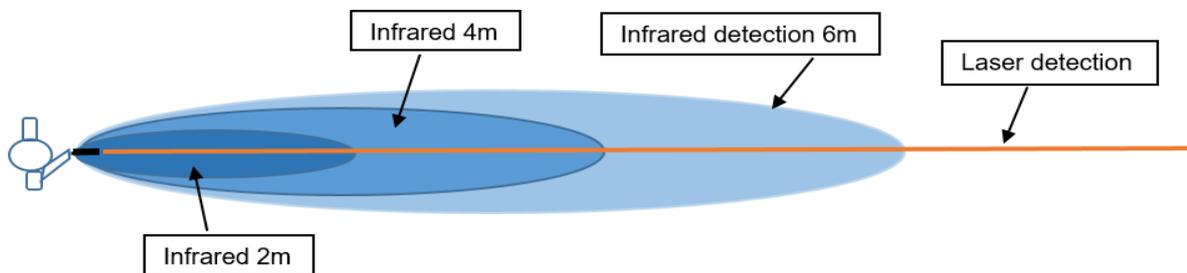


Figure 1.29 : Vue du dessus des champs des trois portées.

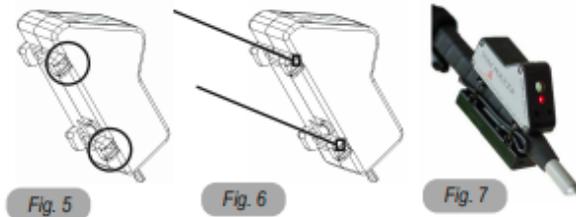
Comme on le remarque dans l'image ci-dessus, plus la portée est petite moins les épaules de l'utilisateur sont protégées, on voit à la figure 1.29 la différence de protection latérale entre la portée de deux mètres et de six mètres.

Si on est en portée de six mètres et que l'on fait une rotation rapide du poignet (appelée coup de poignet), la portée du laser est étendue à 12m.

Pour installer le boîtier sur la canne blanche, il faut avoir deux colliers de fixation et une pince coupante pour éliminer l'excès. Voici l'explication dans la figure 1.30 ci-dessous :

Installation de votre appareil TOM POUCE® :

Etape 1 : Placer 2 colliers de fixation sur les emplacements prévus à cet effet, le côté grippé vers l'intérieur de l'appareil.



Etape 2 : Placez l'appareil sur la partie basse du manche de votre canne blanche et attachez-le à l'aide des colliers de fixation en serrant ces derniers sans excès. Important : Le bouton d'alimentation doit se situer vers le bas de la canne.

Etape 3 : Coupez les bouts qui dépassent des colliers de fixation avec une pince coupante.

Figure 1.30 : schéma explicatif de l'installation de l'appareil sur la canne blanche (documentation fabricant VISIOPTRONIC).

Le retour tactile du Tom Pouce III

L'utilisateur doit balayer devant soi en balayant sa canne sous forme d'arc de cercle (dans son repère égocentré) en allant de gauche à droite puis droite à gauche au rythme des pas pour avoir une information de son environnement. L'amplitude du balayage est telle que l'embout de la canne couvre un peu plus que la largeur des pieds. Le retour de l'information se fait par un vibreur placé dans la paume de la main de l'utilisateur. L'appareil émet trois types de vibration qui viennent en alerte ou confirmer une information :

- A. Lisse ou continue : lors de la détection d'un obstacle situé à plus de deux mètres.
- B. Saccadée rapide : lorsque la détection est à moins de deux mètres. La fréquence des saccades est de 15 Hz.
- C. Saccadée lente : lorsqu'il s'agit d'un obstacle en hauteur. La fréquence des saccades est de sept Hz.

Un interrupteur à trois positions permet de limiter la portée de détection à 2,4 ou six mètres. En portée de deux mètres il y a une exception pour les vibrations, elles sont lisses entre un et deux mètres et saccadées à moins de un mètre.

En outre, il y a plusieurs modes d'utilisation que nous ne décrivons pas en détails car ils n'interviennent pas dans les expériences que nous avons menées.

- a. Mode antibrouillard.
- b. Mode regard sur le côté.
- c. Mode anti forte pluie.
- d. Mode anti chute de neige.

Contenu résumé de la formation au Tom Pouce III

Il n'existe pas de potion magique pour apprendre le chinois, il n'y a pas non plus de formule instantanée pour être à même de savoir exploiter une information sensorielle supplémentaire. Le problème n'est pas de savoir éviter un obstacle avec l'appareil, cela s'apprend en quelques minutes. Par contre savoir trouver son passage avec fluidité de manière optimale (c'est à dire voisine de ce qu'aurait fait un voyant) dans la diversité des situations quotidiennes, sans que cela se fasse au prix d'un effort cognitif exceptionnel, demande en moyenne une trentaine d'heures de formation et environ trois mois d'usage au quotidien. Le protocole détaillé de formation à l'usage de l'instructeur de locomotion est décrit dans la référence suivante : (FARCY R., 2020). Les informations majeures perçues par l'utilisateur sont la direction de la canne, qui doit être connue de manière permanente par l'articulation du poignet gérant la flexion extension, et le fait qu'il y ait une vibration (lisse ou granuleuse) ou son absence dans la direction de la canne. Cela fournit une information en profondeur dans un plan horizontal de la profondeur des passages positionnée par rapport à l'axe corporel de la personne. La seule information artificielle est la vibration, la direction de la canne est une information de nature proprioceptive naturelle. Il faut par contre fusionner ces deux informations pour pouvoir se représenter le profil en profondeur de l'environnement devant soi.

Nous résumons ici quelques points importants.

La première préoccupation du formateur est la bonne tenue de l'appareil. Elle est automatique si la personne respecte la tenue académique de la canne (pouce vers le haut, balayage en flexion-extension pure du poignet). Cependant pour un certain nombre de personnes l'appareil est tenu avec une légère pronation du poignet ce qui fait que lorsque la canne pointe devant le corps, le faisceau est décalé sur le côté. Ce biais est rédhibitoire, car toute la perception sera alors décalée par rapport à l'axe corporel. Si le faisceau explore à gauche alors que la canne est devant la personne, l'utilisateur se cognera systématiquement l'épaule droite. La correction de la tenue de l'appareil se corrige assez facilement, mais demande une vigilance permanente, en effet elle peut avec le temps à nouveau se dégrader progressivement avec les années. Un utilisateur commençant à se cogner fréquemment du même côté doit remettre en cause sa tenue de l'appareil.

La deuxième est l'intégration de la distance des obstacles est un point important, spontanément un utilisateur aura tendance à croire que l'obstacle est au bout de sa canne. Pour la portée de deux mètres, cela ne pose moins de problèmes qu'en portée de six mètres, où l'obstacle peut être 5 m devant. L'erreur est de dévier et de reprendre sa trajectoire avant d'avoir franchi l'obstacle et de se retrouver face à lui. La position avec six mètres de portée est cependant indispensable pour avoir une bonne fluidité et pouvoir marcher de manière décontractée grâce à l'anticipation fournie.

Un troisième point majeur est la hiérarchisation des informations qui est bousculée par la nouvelle source d'informations. En effet, le non-voyant à la canne blanche simple a des stratégies de synthèse entre les informations sonores qu'il reçoit, les sensations tactiles des pieds et de la canne, sa connaissance du lieu ou bien les hypothèses qu'il peut faire en lieu inconnu, sa connaissance des règles de la circulation, etc. Il faut savoir placer les vibrations fournies par l'appareil associée à la direction de la canne, c'est à dire le profil en profondeur de l'environnement dans cette synthèse au bon niveau de hiérarchie : ni trop haut (ce qui amènerait à négliger des informations plus importantes, comme l'arrivée d'un véhicule dans sa trajectoire),

ni trop bas (ce qui l'amènerait à avoir des collisions pour avoir pris en compte d'une information ayant peu d'intérêt, une conversation par exemple).

Le dernier point majeur est le "kilométrage", il faut s'être fait un bagage de situations suffisamment diversifiées pour pouvoir être à l'aise et être capable de faire des analogies entre les situations. C'est également indispensable de l'utiliser quotidiennement pour que ces informations ne représentent plus une charge cognitive importante. Un utilisateur aguerri peut répondre à des plaisanteries tout en gérant des situations délicates.

Tous les utilisateurs ne sont pas égaux par rapport à la manipulation de ce type d'outil. Le résultat final est cependant très fortement corrélé à la motivation de la personne pour son autonomie et à son kilométrage quotidien.

Résumé de la section II.2

La substitution sensorielle consiste à remplacer une entrée sensorielle manquante par une autre entrée sensorielle disponible. L'alphabet braille pour la lecture et l'écriture en est une illustration. Beaucoup de tentatives pour substituer les entrées sensorielles visuelles absentes chez les non-voyants par les sens tactile ou auditif ont été faites ces 50 dernières années, mais n'ont pas abouti à un dispositif offrant un usage fonctionnel pour les non-voyants. Ces tentatives ne permettent pas de produire un percept 2D/3D du monde équivalent à celui issu de la vision.

Chez les non-voyants, l'outil actuel de substitution sensorielle de référence pour réguler ses déplacements locomoteurs est la canne blanche. Plusieurs propositions ont été faites pour ajouter à la canne blanche des capteurs permettant de fournir à l'utilisateur des informations sur l'environnement (par ex., la présence d'un objet, d'une ouverture), à plus grande distance que la canne blanche, facilitant ainsi la régulation des déplacements. Ces dispositifs (canne avec capteurs) ont été évalués selon trois angles différents dans la littérature : analyse des performances des capteurs et des temps de réaction de l'individu aux informations tactiles ou sonores; évaluation de l'aptitude d'un utilisateur à traverser un parcours d'obstacles sans collisions; recueil qualitatif des avis des utilisateurs. De façon problématique, on constate que toutes ces études ont été faites soit chez des non-voyants sans expérience de l'outil, soit chez des voyants sous bandeaux. Il n'y a pas d'études avec des utilisateurs quotidiens de ces dispositifs. Par ailleurs, ces études rapportent des vitesses de déplacement très faibles en situation d'évitement d'obstacle, de l'ordre de 0,25 m/s, soit le quart d'une vitesse de marche normale. Enfin, la canne blanche électronique Tom Pouce III qui sera utilisée dans les études de ce manuscrit a été présentée, ainsi que son processus de formation à son usage.

II.3. La perception de la passabilité d'une ouverture

Dans cette section on parlera des travaux de recherche menés sur la perception de la passabilité d'une ouverture. Il s'agit pour un sujet d'avoir le comportement adapté pour traverser l'ouverture : être capable si elle est trop étroite de la contourner ou de faire une rotation des épaules, de la passer de front (action demandant le moindre effort) si elle est suffisamment large. La passabilité d'une ouverture est souvent étudiée en rapport avec la notion d'affordance. Le terme "affordance" est relativement récent, il est introduit en 1977 par James J Gibson (Gibson, 1977). L'affordance est l'ensemble de toutes les possibilités d'action par rapport à un environnement. Bien entendu les possibilités d'action dépendent de l'individu. Une personne très large d'épaules n'aura pas les mêmes possibilités d'action par rapport à une ouverture qu'une personne très étroite d'épaules. Une définition équivalente du terme affordance, formulée de manière légèrement différente est donnée par William Gaver (Gaver, 1991) : "Propriétés de l'environnement qui rendent certaines actions possibles pour un individu qui est équipé à cette fin".

Les études de passabilité d'ouverture à la vue sont nombreuses, nous rapporterons également une étude faite avec des voyants sous bandeaux avec un prototype de dispositif de substitution sensorielle.

II.3.1. Perception de la passabilité en mode visuel

Warren et ses collègues se sont penchés sur le rapport entre la largeur des épaules et la largeur de l'ouverture pour qu'un voyant passe de front (Warren, 1987). Les actions possibles par rapport à l'ouverture sont : (i) maintenir une posture de marche frontale, (ii) s'adapter en tournant le corps pour passer l'ouverture, ou (iii) contourner l'ouverture. L'expérience se focalise sur le point de transition entre les (i) et (ii). Les participants étaient divisés en deux groupes d'hommes ayant des épaules larges et des épaules étroites. Ils partent d'un point de départ à sept mètres de l'ouverture à deux vitesses : normale et rapide. La largeur de l'ouverture varie entre 35 et 90 cm avec un pas de cinq cm, choisi au hasard. 132 essais sont effectués pendant une heure. A vitesse de marche normale, un rapport de 1.3 a été trouvé entre la largeur de l'ouverture et celle des épaules, indépendamment de la taille du corps de la personne. Cela signifie que pour une personne ayant 50cm de largeur d'épaule, il faut au moins une ouverture de 65cm pour que la personne passe l'ouverture de front sans effectuer de rotation d'épaule.

Davis et ses collègues (Davis, 2010) ont étudié la différence de comportement entre une personne qui traverse une ouverture seule et deux personnes traversant l'ouverture ensemble à côté l'une de l'autre. Tous les participants étaient des voyants en mode visuel, placés à quatre mètres en face de l'ouverture. Ils ont conclu à la fin de cette expérience que la largeur d'ouverture nécessaire pour que le binôme passe de front était légèrement inférieure au double de celle nécessaire à l'individu seul.

Baker et ses collègues (2017) ont étudié le comportement des voyants dans le contexte de l'évitement d'obstacles. Leur but est d'évaluer les effets de la distance à l'obstacle sur les stratégies de franchissement d'une ouverture. Il s'agit de traverser une ouverture constituée de deux poteaux identiques espacés entre 0.9 et 1.7 m sans contact dans une pièce de 10 mètres de long. L'ouverture est placée à trois, cinq ou sept mètres du point de départ comme le montre la figure 1.31 ci-dessous. Notons que l'écart entre les deux poteaux était adapté en fonction de la largeur des épaules des participants. Aucun effet de la distance à l'obstacle n'a été identifié. Les auteurs ont remarqué que les participants ont réduit significativement leur vitesse de marche à l'approche de l'ouverture lorsque les obstacles étaient localisés à sept mètres du point de départ, par rapport à ceux à cinq ou trois mètres.

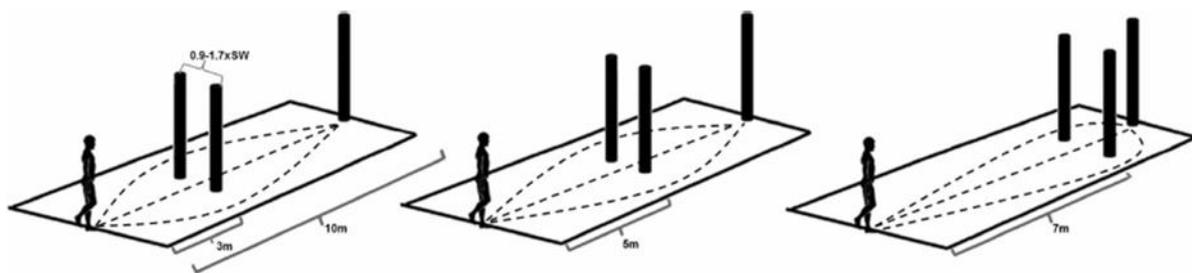


Fig. 1 Experimental set-up—a 10-m-long pathway was created. Two identical pole obstacles were placed 3, 5, or 7 m from the starting location. A *midline*, horizontal gap was created between the obsta-

cles. The gap varied between .9 and 1.7× each individual's shoulder width, in increments of .2

Figure 1.31 : images illustrant l'expérience réalisée par Baker en 2017.

Les auteurs ont par ailleurs étudié deux données lors de l'évitement, la marge de sécurité AP (distance à partir de laquelle l'évitement commence lorsque l'ouverture n'est pas passable) et la marge de sécurité ML (distance de sécurité entre l'épaule de la personne et le bord extérieur de

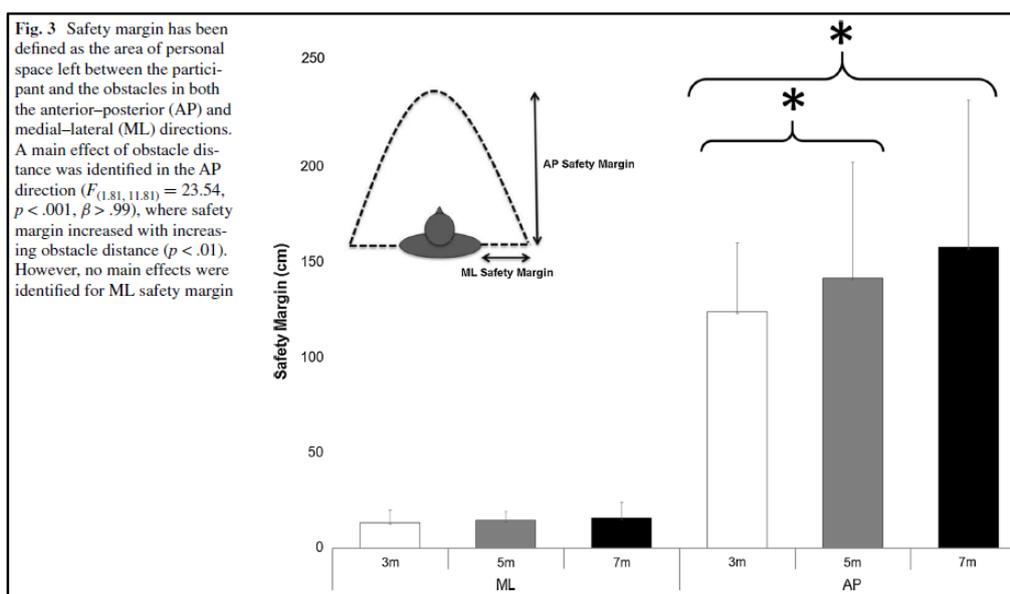


Fig. 3 Safety margin has been defined as the area of personal space left between the participant and the obstacles in both the anterior-posterior (AP) and medial-lateral (ML) directions. A main effect of obstacle distance was identified in the AP direction ($F_{(1,81, 11,81)} = 23,54, p < .001, \beta > .99$), where safety margin increased with increasing obstacle distance ($p < .01$). However, no main effects were identified for ML safety margin

l'obstacle). Ils ont remarqué (voir figure 1.32 ci-dessous) que ML dépend peu de la distance de départ à l'obstacle mais que AP croit avec cette distance.

Figure 1.32 : résultats du ML et AP (distance à partir de laquelle l'évitement commence lorsque l'ouverture n'est pas passable) conclus dans (Baker, 2017).

Lucaites et ses collaborateurs (2018) ont réalisé une étude avec des participants voyants pour franchir une ouverture en s'appuyant sur un déambulateur à quatre pieds ou roues, une canne de marche ou pas d'outil. Les participants se positionnent face à une ouverture et doivent dire à l'oral si « OUI » ou « NON » ils peuvent passer. Puis dans l'essai suivant, les participants donnent leur jugement et franchissent l'ouverture. Les résultats ont montré que l'utilisateur s'adapte rapidement à son outil et que la largeur du déambulateur, plus grande que celle du corps, est rapidement intégrée dans le jugement de passabilité de l'ouverture (figure 1.33 ci-dessous).

Figure 3. Probability of making an accurate judgment by Door width and Walking Device.

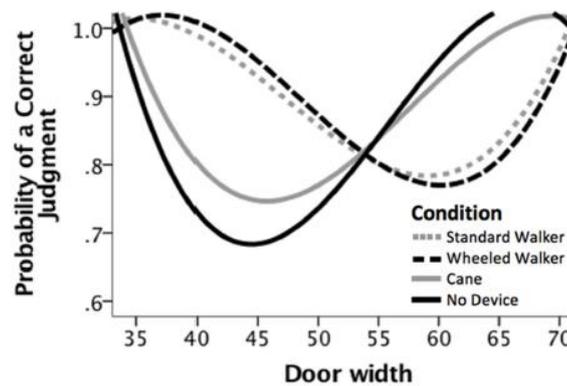


Figure 1.33 : il a été conclu selon le graphe que l'utilisateur s'adapte rapidement à son outil et intègre la largeur du déambulateur dans le jugement de la passabilité.

II.3.2. Perception de la passabilité en mode non visuel

A l'audition : Riehm et ses collaborateurs (Riehm, 2018) ont réalisé une étude sur la passabilité d'une ouverture signalée par un son virtuel, chez les voyants sous bandeau. Ils ont analysé la capacité des individus à percevoir la passabilité des ouvertures construites à l'aide de deux sources sonores virtuelles entendues au casque. Ils ont analysé à l'aide de caméras la rotation de la tête et des épaules lors du passage entre les deux sources virtuelles. Ils ont trouvé une différence significative entre le groupe aux épaules larges et le groupe aux épaules étroites, par contre en faisant le rapport largeur de l'ouverture divisé par la largeur des épaules, ils n'ont plus trouvé de différence entre les deux groupes. Ce résultat est de même nature que celui de Warren établi avec la vision.

Avec un télémètre infrarouge : Favela et ses collaborateurs (Favela, 2018), ont réalisé une étude avec des personnes voyantes selon trois modalités :

1. A la vue.
2. Avec une canne en bois (simulant la canne blanche) sous bandeau.
3. Avec L'outil « Enactive Torch » sous bandeau.

« Enactive Torch » est un outil de substitution sensorielle, constitué d'un télémètre infrarouge, convertissant la distance en vibrations sur le poignet (figure 1.34 ci-dessous). L'étude est réalisée

dans une pièce fermée, avec 27 sujets voyants naïfs sous bandeaux ayant eu un entraînement aux outils (canne et Enactive Torch). Ils devaient juger de la passabilité d'une ouverture variant entre 40 cm et 75 cm, en étant positionné de manière statique à 76 cm de l'ouverture, selon les trois modalités citées ci-dessus. La mesure du Point d'Équivalence Subjective (PSE) correspondant à la largeur de l'ouverture pour laquelle les participants répondent qu'ils/elles peuvent la



traverser dans 50% des cas n'a pas montré de différence significative entre les modalités. Sur la question de la confiance en leur jugement, ils étaient plus confiants avec la vue. Par contre la distance de 76cm à laquelle ils étaient placés de l'ouverture pour juger de la passabilité est bien trop courte pour avoir une utilité fonctionnelle dans le déplacement.

Figure 1.34 : image illustrant le dispositif de favela et al, 2018.

De même, De Paz et ses collaborateurs (2019) ont utilisé une matrice de six lignes de 12 vibreurs placés dans le dos pour transférer l'information de caméras dans un espace deux mètres par 80 cm en donnant 30 secondes aux utilisateurs pour juger la passabilité d'une ouverture avec des sujets aux épaules larges et étroites. Ils ont retrouvé un lien entre la largeur des épaules et le jugement de passabilité d'une ouverture. Le temps de décision de 30s n'est pas fonctionnel dans le cadre d'un déplacement.

Résumé de la section II.3.

Pour conclure, les études portant sur la perception de la passabilité d'une ouverture confirment un ratio constant entre l'ouverture et la largeur des épaules, aussi bien pour la vue que pour l'audition. Dans le cas d'un équipement (déambulateur), la largeur de l'équipement est prise en compte avec l'entraînement au même titre que celle du corps. Pour les dispositifs de substitution sensorielle, la perception de l'affordance d'une ouverture a été étudiée chez des sujets voyants sous bandeau, dans des conditions qui ne permettent pas un déplacement fonctionnel (position statique très proche de l'objet, environ 76 cm, ou avec un temps d'exploration très long avant une décision, de l'ordre de 30s).

III. Problématique et hypothèses

L'objectif final de **ce travail est d'observer et comprendre le comportement des utilisateurs dans des situations maîtrisées et reproductibles proches de celles de la vie courante** afin de contribuer à l'amélioration du service apporté aux déficients visuels par la canne électronique. La contribution recherchée se situe à plusieurs niveaux du plus appliqué au plus fondamental :

- Objectiver la capacité de l'utilisateur à anticiper et réguler sa trajectoire sans contact mécanique entre le corps ou la canne blanche et les obstacles grâce à l'information apportée par les capteurs de la canne électronique Tom Pouce III.
- Localiser les limites de l'appareil en termes d'information apportée à l'utilisateur.
- Proposer des objectifs d'améliorations pour les capteurs de la future génération d'appareils.
- Ébaucher une analyse des processus cognitifs, notamment la représentation de l'espace, mise en jeu dans l'utilisation de l'outil.

On a vu dans la bibliographie que les causes de la cécité et l'âge d'apparition sont variés. Les conséquences sur la vie quotidienne sont également très diverses en fonction du mode de vie. La façon de compenser les déficits induits dépend également beaucoup de la personne.

D'autre part, le seul outil de substitution sensorielle fonctionnel de la vue pour les déplacements largement utilisé pendant les 50 dernières années, a été la canne blanche longue simple. Pour cette raison les études préalables portant sur les cannes électroniques se sont faites avec, soit des sujets voyants sous bandeaux, soit des sujets non-voyants naïfs sans connaissance préalable de l'outil. Nous avons lors d'un test préliminaire (Dernayka 2019) inclus des participants voyants sous bandeau naïfs utilisant la canne électronique. On a constaté que leurs actions sont difficilement mesurables par leur manque d'expérience avec l'outil. L'exercice sous bandeau leurs demande beaucoup plus d'effort cognitif et de concentration qu'une personne expérimentée. Pour cette raison, on a décidé d'inclure les sujets voyants uniquement pour des tests à la vue selon leur fonctionnement physiologique naturel et les sujets non-voyants expérimentés sous bandeaux (pour éliminer toute information d'une éventuelle vision résiduelle) utilisateur de l'outil au quotidien. Dos Santos (2020) a également conclu que les participants voyants sous bandeau n'ont pas assez d'expertise et d'expérience comme les personnes aveugles. C'est pour cela qu'on ne les considère pas comme une base solide de comparaison dans les modalités non visuelles.

Aucune étude, hormis celle de l'équipe (Damaschini et al 2005), à notre connaissance, ne montre des mesures faites avec des sujets non-voyants expérimentés qui utilisent un outil de substitution de la vue depuis plusieurs années dans leur vie quotidienne.

Nous avons choisi de mettre comme critère d'inclusion l'utilisation de l'outil Tom pouce III depuis plus de deux ans pour les non-voyants. En effet, dès les débuts du Tom Pouce au début des années 2000 et de son prédécesseur le Télétact à la fin des années 1990, il a rapidement été clair que quel que soit l'outil, une formation telle que présentée au §II.2.3.3 était incontournable. Même s'il y a eu de nombreuses évolutions pour améliorer le matériel pour pouvoir rendre l'outil plus facilement accessible aux utilisateurs, la création d'un vécu initial avec l'outil structuré par les rééducateurs a gardé toute sa signification et son caractère indispensable. L'utilisation d'utilisateurs débutants ou naïfs ou de voyants sous bandeaux dans notre contexte n'a pas de

sens dans la mesure où ils ne sont pas en mesure d'exploiter de manière correcte le potentiel de l'outil, ils ne maîtrisent ni les fonctions écologiques, ni celles cognitives qui demandent un vécu conséquent. Ils font de fréquents ratés dus à l'énergie cognitive importante à mettre en œuvre dans la phase d'apprentissage. Les sujets déclarent avoir intégré le fonctionnement de l'outil, les réflexes et réduit l'énergie cognitive d'utilisation à un niveau seuil au bout de trois à six mois. Une cause d'échec dans la formation est l'incapacité à réduire son énergie cognitive dans l'utilisation, ou à établir les réflexes plus que l'incapacité à gérer dans l'absolu sa trajectoire avec l'appareil.

Pour les tests comparatifs entre la canne blanche simple et la canne électronique, nous avons utilisé les sujets utilisateurs de canne électronique en retirant l'appareil de la canne. Un axe de critique est le suivant : utilisant la canne électronique depuis longtemps, on pourrait leur reprocher de ne plus optimiser leur utilisation de la canne blanche. Cette critique est recevable, mais nous pouvons remarquer que le balayage de la canne simple est très proche de celui de la canne électronique. Il est juste moins large pour certains utilisateurs (largeur des pieds plutôt que des épaules), mais la synchronisation est la même ainsi que la tenue du poignet. De plus durant leur formation à la canne électronique, faite par les mêmes instructeurs de locomotion que ceux qui enseignent le maniement de la canne blanche, la correction de leur balayage de canne, indispensable au bon fonctionnement de la canne électronique (un mauvais balayage de la canne envoie une information sur l'espace mal positionnée par rapport à l'axe corporel), a été faite. Ces utilisateurs de canne électronique utilisent très probablement la canne blanche mieux qu'un utilisateur moyen de la canne seule. Voyons l'alternative possible : faire des tests comparatifs avec des utilisateurs de canne seule. Beaucoup de références Loomis (2002) par exemple ont remarqué que les résultats des tests étaient très utilisateur-dépendant, et sur de petits nombres on pouvait avoir facilement des biais de population, ce qui a rendu par exemple les comparaisons entre la représentation spatiale des non-voyants congénitaux et acquis contradictoire entre plusieurs publications... En retenant le même utilisateur pour la canne blanche simple et électronique on minimise le risque de biais dans le choix de la population.

L'utilisation de voyants dans les expériences a été faite uniquement pour évaluer la régulation de la trajectoire avec la modalité visuelle (modalité de référence pour les déplacements) et ainsi pouvoir mesurer l'écart entre la vue et la canne électronique.

Les tests d'utilisation de la canne électronique présentés dans la bibliographie se sont avérés trop rudimentaires, décrits de manière trop imprécise, ou encore trop éloignés des problématiques de la vie courante pour pouvoir répondre à nos besoins.

Notre premier problème a été de concevoir une batterie d'études pouvant montrer la façon dont un utilisateur au quotidien régule sa trajectoire dans des conditions représentatives de la variété des situations de la vie réelle. Afin que ces études puissent être reproduites, soit sur d'autres dispositifs, soit refaites dans le futur, nous nous sommes posé la contrainte de faire des environnements reproductibles non tributaires d'une infrastructure particulière existante. De plus, afin que la reproduction des tests soit facilement accessible, nous avons fait attention à ce que le matériel utilisé pour créer les pistes imitant les situations réelles soit le moins coûteux possible et le plus simple à installer. Avant que le protocole ne soit proposé aux déficients visuels, j'ai expérimenté avec quelques membres de l'équipe les procédures.

On a prélevé les données suivantes : nombre de collisions ou/et frôlement, le temps mis à traverser le trajet, conformité de la trajectoire aux instructions, etc. Ces données que nous relevons sont voisines de celles des travaux précédents réalisés par O'Brien et Mohtar en (2014), de Dos Santos, Medola et Cinelli en (2020), celui de Jeong et Yu en (2016), de Kim et Cho en (2013), de Alejandro de García en (2012), Vorapatratorn, S. & Nambunmee, K. (2014).

Un test préalable a consisté pour vérifier le bon fonctionnement des capteurs pour une variété d'obstacles dont les dimensions, structures et couleurs sont différentes, en faisant aussi varier les conditions climatiques. Ceci afin de s'assurer que lors des études les déficients visuels reçoivent correctement les informations attendues.

Les configurations abordées et les hypothèses ont été les suivantes :

1. le pointage locomoteur : Il s'agit d'analyser la position de poteaux placés à quelques mètres de distance pendant cinq secondes, selon trois modalités : la vue, l'audition et la canne électronique (retour proprioceptif et tactile) puis d'aller se positionner à la place des poteaux (ceux-ci ayant été retirés). L'hypothèse est la suivante : la canne électronique permet de se faire une représentation spatiale de l'emplacement d'un poteau par rapport à son corps avec une précision comparable à l'audition ou la vue. Les sujets non-voyants ont effectué les tests à l'audition et à la canne électronique, les sujets voyants à l'audition et à la vue.
2. Le choix de passage : Il s'agit de prendre le passage demandé par l'investigateur parmi les quatre possibles. Les passages se situent à quatre mètres de distance devant les sujets. L'hypothèse est la suivante : la canne électronique permet une meilleure identification d'un passage par rapport à la canne blanche. L'identification du passage à la canne électronique est comparable à celle à la vue. Les sujets non-voyants ont effectué les tests à la canne simple et à la canne électronique, les sujets voyants à la vue.
3. Perception de la passabilité d'une ouverture : il s'agit de traverser une ouverture d'une largeur présentée aléatoirement (de 0 à 120 cm par pas de 15cm) ou de la contourner, selon trois modalités : TP3 sans et avec Feedback, Vue sans et avec Feedback, Canne blanche avec Feedback. L'hypothèse est la suivante : la canne électronique permet une identification viable de la passabilité d'une ouverture à distance. L'identification de la passabilité à la canne électronique est comparable à celle à la vue. Les sujets non-voyants ont effectué les tests à la canne simple et à la canne électronique, les sujets voyants à la vue.
4. Navigation entre les obstacles sur une courte durée : il s'agit de traverser un couloir de 25 mètres de long et 2,4 m de large sans collisions ni frôlements avec les obstacles ; selon deux modalités pour les non-voyants en ayant cinq essais (canne blanche simple et canne électronique). L'hypothèse est la suivante : la canne électronique permet de mieux éviter les obstacles par rapport à la canne blanche afin de permettre une meilleure régulation de la trajectoire. Les sujets non-voyants ont effectué les tests à la canne simple et à la canne électronique.

5. Navigation entre les obstacles sur une longue durée : il s'agit de traverser un couloir de 25 mètres et 2,4 m de large sans collisions ni frôlements avec les obstacles pendant 20 minutes, sans arrêts en faisant des allers-retours. L'hypothèse est la suivante : La canne électronique engendre une perte de performance dans la durée due à la fatigue mentale des utilisateurs. Les sujets non-voyants ont effectué les tests à la canne électronique.

L'observation des cinq protocoles expérimentaux, l'analyse des hypothèses préalables et l'observation des comportements imprévus des sujets vont nous permettre de discuter les points suivants dans l'ordre logique suivant :

- Y - a- t-il une différence objective de régulation du mouvement entre l'utilisation d'une canne électronique et d'une canne blanche simple ?
- Quelles sont les configurations où l'outil donne une perception instantanée complète de l'environnement ?
- Dans quelles situations l'outil donne- t-il une information incomplète, plus ou moins facilement compensable par la représentation spatiale du sujet ?
- Quelles sont les lacunes de l'appareil se répercutant sur le comportement de l'utilisateur et que pourrait-on faire pour les compenser ?

Le cheminement

Dans cette partie, j'exposerai la démarche qui a amené à structurer le travail en partant d'une base expérimentale initiale et non théorique. La première raison est qu'aucune étude préalable sur les cannes électroniques n'ont fait intervenir de sujets expérimentés avec un outil d'aide au déplacement hormis celle réalisée par l'équipe en 2005 en situation réelle non totalement contrôlée. Nous sommes la première étude en milieu contrôlé avec ce type de population utilisatrice d'un outil au quotidien depuis plusieurs années, qui a pu donc faire évoluer la régulation de son mouvement par rapport à l'outil de base qu'est la canne blanche. Comme il est hasardeux d'anticiper une approche théorique sans une base expérimentale minimale nous nous sommes concentrés sur l'observation dans un premier temps.

Pour que nos observations puissent avoir une suite, elles doivent être le plus facilement possible reproductibles. Cela implique de nombreux problèmes pratiques :

- Le montage expérimental doit être simple, rapide à mettre en œuvre et facile à transporter.
- Le montage doit être indépendant d'un lieu particulier, et s'il s'appuie sur des structures extérieures (un mur par exemple), cela doit être une configuration facile à trouver dans la plupart des endroits.
- Le matériel ne doit pas être coûteux, les éléments doivent être facile à approvisionner, légers et peu encombrants.
- Les exercices proposés doivent rester crédibles par rapport à des situations de la vie courante.
- Les mesures doivent être objectives et reproductibles sans ambiguïté.

- La participation aux expériences ne doit pas être rébarbative pour les sujets afin d'éviter les pertes entre les différentes sessions de tests.
- Le choix des participants ne doit pas inclure des critères sélectifs cachés autres que ceux du protocole (un choix de participants connus pour leur utilisation particulièrement performante de l'outil serait un biais).

Avant d'élaborer les protocoles, nous avons fait de nombreux essais sur nous-mêmes et avec des voyants yeux bandés pour tester l'organisation logistique, le choix du matériel, la possibilité d'effectuer des mesures objectives sur le protocole, la clarté des consignes, la faisabilité du nombre d'essais etc. Cette phase longue et empirique de prétests ne sera pas détaillée dans le manuscrit, l'un de ces tests préliminaires a été présenté en conférence (Dernayka et al 2019).

Choix du lieu et des obstacles pour les protocoles

Il s'est avéré qu'il était très difficile de trouver une rue avec des conditions reproductibles, le déplacement du non-voyant étant multisensoriel, les résultats pouvaient être affectés par la variabilité de l'environnement (sons, passants, poubelles à certains jours de la semaine, travaux etc.). Certains obstacles, bien qu'existant au quotidien et potentiellement blessants, ne sont pas non plus acceptables dans notre contexte expérimental. Nous avons donc convergé vers des blouses sur porte manteaux ou assemblages de blouses sur porte manteaux pour simuler les obstacles (poubelles, décrochement de mur, mur etc. :

- avantages : non blessant, léger, facile à déplacer, à stocker, à monter
- inconvénients : sensible au vent

Pour l'espace expérimental nous avons donc convergé vers un hangar ou salle de sport abrité du vent. Le toit permet également de protéger de la pluie ce qui facilite le déroulement des expériences.

Pour la simulation des trottoirs afin de ne pas faire des structures surélevées, lourdes et longues à installer, nous avons délimité les bords de trottoirs par des barres de 7x7cm par deux mètres au sol. Simuler un trottoir de 25 m se fait avec une douzaine de barres, peu coûteuses et pesant moins de 5 kg chacune. Le poids reste toutefois suffisant pour que la barre ne se déplace pas lors d'un choc avec le bout de la canne.

Le choix du matériel de mesures

On a utilisé dans nos expériences des outils d'analyses à faible niveau d'instrumentation. Un smartphone pour filmer, le chronomètre de la vidéo, un télémètre laser commercial de chantier pour les mesures de distances dans le protocole du pointage locomoteur, un tapis en linoléum quadrillé et annoté pour relever à partir de la vidéo des éléments de trajectoire dans le protocole de passabilité d'une ouverture.

Le retard dû à la situation sanitaire

En janvier 2020 on a démarré les tests avec les participants non-voyants. Les tests ont été interrompus en mars 2020 à cause du premier confinement. A cette date on avait réussi à réaliser les expériences avec cinq personnes. Pendant le confinement, j'ai analysé ces résultats ce qui a permis de mettre au point les procédures de dépouillement et d'analyse. En juin 2020, après le confinement on n'avait plus les salles du gymnase à l'université à cause de la situation sanitaire. On a trouvé plus tard le hangar semi-ouvert au laboratoire Aimé Cotton, qui était nouvellement construit (bâtiment rendu début octobre 2020). Mais malheureusement, encore une fois, l'année 2021 n'était pas facile à cause des mesures strictes mises en place par le gouvernement concernant la situation sanitaire, et la disponibilité non continue de la Hall technique du laboratoire Aimé Cotton à cause de reprises de malfaçons de construction. Ceci a provoqué plusieurs mois de retard dans le déroulement des expériences.

IV. Contributions expérimentales

Le premier protocole intitulé “Déteçtabilité de la canne électronique” consiste à vérifier le bon fonctionnement de l’appareil dans différentes conditions climatiques et pour différentes catégories d’obstacles. Ce n’est pas un protocole à priori sujet dépendant. Il s’agissait uniquement de vérifier si le vibreur de l’appareil se mettait ou pas en marche dans une configuration donnée de détection d’obstacle, afin d’être sûr des informations que les déficients visuels allaient recevoir dans les autres protocoles. Dans la mesure où l’on n’a pas trouvé de différence mesurable entre les premiers sujets, on s’est limité à trois sujets voyants uniquement pour tester l’outil dans les différentes conditions retenues.

Concernant les autres protocoles : pointage locomoteur vers un objet distant, choix de passage, perception de la passabilité, navigation simple et navigation répétée on fait intervenir des personnes voyantes avec la modalité visuelle pour avoir une référence sommaire de ce qui se fait habituellement avec la vue. Les personnes voyantes ne sont pas forcément les mêmes dans les cinq protocoles, ce sont des collègues de travail qui ont été volontaires et recrutés indépendamment pour chaque protocole.

Pour les sujets non-voyants qui sont le cœur de l’étude, ce sont les mêmes personnes qui participent aux cinq protocoles. Il y a eu deux critères d’inclusion pour ces derniers : deux ans au moins d’utilisation au quotidien de la canne électronique Tom Pouce III, proximité géographique avec notre lieu d’expérience qui est à Orsay. Nous avons commencé avec cinq sujets, les résultats partiels nous ont mené à un chiffre de 12 personnes suite à l’observation du degré d’homogénéité des résultats des premiers sujets et des moyens logistiques à disposition. Il y a eu 17 personnes contactées. L’ensemble des expériences ont été réparties sur deux journées différentes pour chaque sujet. Dont quatre n’ont pas souhaité venir (covid, indisponibilité de dates etc.), un ne s’est pas présenté à la seconde session. Nous ne connaissons que trois sujets, les plus proches géographiquement avant les expériences, nous n’avons aucune idée du niveau d’habileté à l’utilisation de l’outil des autres sujets. Il n’y a pas eu de sélection, ni d’information préalable de prise auprès des rééducateurs sur le niveau de performance de l’utilisateur.

IV.1 Localisation d’objets dans l’environnement

IV.1.1. Déteçtivité de la canne électronique

On a mis en place une batterie de tests de déteçtivité afin de s’assurer que le dispositif remplit bien ses fonctions de détection dans le contexte d’une utilisation standard, sous différentes conditions lumineuses en extérieur.

1.1.1. Participants

Nos participants étaient trois voyants, hommes âgés entre 22 et 28 ans. On les a recrutés sur la base du volontariat selon leur disponibilité sans autres critères.

1.1.2. Matériel et Méthode

Le test est destiné à décrire le comportement de l'appareil face à différents obstacles et conditions de luminosité. Il est intitulé « test de détection ».

Dans ce test on a considéré quatre catégories d'obstacles :

1. Obstacle large blanc : représentatif des gens avec des habits clairs, des arbres, des poteaux électriques.
2. Obstacle large noir : représentatif des gens avec des habits foncés, des poteaux téléphoniques.
3. Obstacle fin noir : représentatif des poteaux anti-stationnement noirs, des fines franchises d'arbres sans feuilles.
4. Obstacle fin blanc : représentatif des poteaux anti-stationnement clairs.

Dans trois conditions de luminosité :

- a) Obscurité totale.
- b) Luminosité moyenne avec pluie.
- c) Haute luminosité.

On a de même mesuré la capacité à détecter différentes largeurs d'ouvertures (25, 50, 75, 100 et 125 cm) à différentes distances (un, deux, quatre, six et 12 mètres) en balayant avec l'embout de la canne à différents rythmes correspondant à de la marche lente à rapide.

Nous avons adopté les recommandations des cours de mobilité de référence (Ratelle A. et Couturier J.-A., 2019) (Smith, L., and Penrod, 2010), pour décrire le mouvement de la canne en marchant. La personne aveugle doit coordonner ses pas avec le bout de la canne. Par exemple, lorsque la personne fait un pas en avançant son pied droit, la canne part vers la gauche et inversement. La largeur du balayage du bout de la canne est égale à la largeur des épaules (c'est la recommandation à la canne seule, à la canne électronique c'est la largeur des pieds, la portée des faisceaux garantissant la protection latérale).

La vitesse de rotation de la canne pendant le balayage est crucial pour la détection de l'ouverture. Nous avons considéré plusieurs paramètres standards pour une personne mesurant 1,70 m avec une largeur d'épaule de 50 cm. Pour une longueur de pas de 65 cm et une durée de pas de 0,6 s (cadence de pas $1/0,6 = 1,66$ Hz), la vitesse de marche serait de $0,65 \text{ m}/0,6 \text{ s} = 1,08 \text{ m/s}$ ou 3,7 km/h. La longueur de canne recommandée dans ces conditions est de 1,3 m. Ici, la distance entre l'embout de la canne et l'avant du pied de l'utilisateur, mesurée le long du sol, serait d'environ un mètre, et la largeur angulaire du balayage serait d'environ un demi-radian. La vitesse de rotation moyenne de la canne serait de $0,5 \text{ rad} \times 1,66 \text{ Hz} = 0,8 \text{ rad/s}$. En plus de ces paramètres de marche normaux, nous avons également considéré les marcheurs plus lents. En moyenne, les conditions de la marche étaient les suivantes :

- 3,7 km/h (1,08 m/s) pour une vitesse de marche normale avec une cadence de balayage de 1,66 Hz, correspondant à une vitesse de rotation de la canne de 0,8 rad/s ;

- 1,85 km/h (0,54 m/s) pour une vitesse de marche réduite, avec une vitesse de balayage de 0,88 Hz et une vitesse de rotation de canne de 0,4 rad/s ;
- 0,925 km/h (0,254 m/s) pour une vitesse de marche hésitante avec une vitesse de balayage de 0,44 Hz et une vitesse de rotation de la canne de 0,2 rad/s.

La figure 4.1 représente la trajectoire de l'embout roulant de la canne pour une personne marchant vers l'ouverture d'un mur. Ici, d est la distance de la personne au mur et Y est la largeur du balayage de la pointe de la canne.

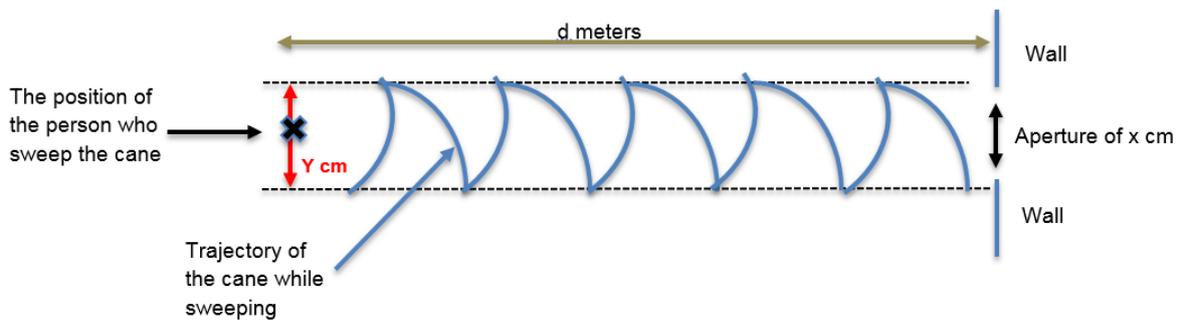


Figure 4.1 : Illustration décrivant le mouvement de la pointe de la canne en marchant.

Pour vérifier si la canne peut être utilisée pour détecter les obstacles dans des conditions de marche standard à différentes distances, nous avons :

- Fixer la distance d (six mètres par exemple),
- Fixer la largeur du balayage de la pointe de la canne (50 cm par exemple), limitée par des barres parallèles au sol (cf. Figure 4.2),
- Utiliser un métronome pour fixer la cadence des allers retours du bout de la canne au sol (1,66 Hz par exemple).

Pour un obstacle mince, si l'utilisateur ressentait une vibration dans la direction de l'obstacle à la vitesse de balayage donnée, l'obstacle était considérée comme détecté par les capteurs. Pour une ouverture, si l'utilisateur ne ressentait aucune absence de vibration dans la direction de l'ouverture à la vitesse de balayage donnée, elle était considérée comme non détectée.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.2 : Un participant voyant aux yeux bandés balayant la canne entre les deux barres à une cadence donnée pour détecter (a) un grand obstacle sombre dans des conditions de luminosité intermédiaires ; (b) un poteau mince blanc en plein soleil; (c) un poteau mince sombre en plein soleil et (d) une ouverture.

1.1.3. Résultats et Discussion

Dans cette partie je présenterai les résultats obtenus du « test de détection ».

Dans les tableaux 4.1 et 4.2 ci-dessous, nous avons utilisé la même méthode de mesure que celle expliquée ci-dessus (cf. figure 4.2). Le « lux » est une unité de mesure de l'éclairement lumineux. Plus précisément, 0 lux correspond à l'obscurité totale et 100 000 lux à l'éclairement maximal possible sur Terre. L'objectif était de vérifier si l'appareil détecte correctement les obstacles dans des conditions d'ensoleillement à la fois élevées et faibles. Le tableau 4.1 montre les résultats pour un gros obstacle blanc (foncé ou blanc) ou fin et le tableau 4.2 pour un obstacle fin et sombre. Ces tableaux montrent les résultats de la détection à différentes vitesses de balayage et illuminations (D signifie obstacle détecté et ND signifie obstacle non détecté). Pour le tableau 4.1 les résultats ont été les mêmes pour les grands obstacles blancs et noirs, d'où un seul tableau.

Large Dark or White Obstacle (Length: 1.2 m; Width: 50 cm), Thin White Obstacle (Length: 1.5 m; Width: 4 cm)												
Lux	0 lux (full darkness)			0.01–5000 lux (case of rain)			5000- 50,000 lux			>50,000 lux		
Sweeping speed (rad/s)	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8
Distance (m)												
0.8 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
1.7 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
3.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
5.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
11.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Tableau 4.1 : Ce tableau montre les résultats de la détection d'un grand obstacle sombre à différentes distances, vitesses de balayage et illuminations (D signifie détecté et ND signifie non détecté). Les résultats étaient les mêmes pour les grands obstacles blancs.

Thin Dark Obstacle Detection (Length: 1.5 m; Width: 4 cm)												
Lux	0 lux (full darkness)			0.01–5000 lux (case of rain)			5000- 50,000 lux			>50,000 lux		
Sweeping speed (rad/s)	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8
Distance (m)												
0.8 m	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1.7 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
3.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
5.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
11.5 m	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	ND

Tableau 4.2 : ce tableau montre les résultats de la détection d'un obstacle fin noir à différentes distances, vitesse de balayage et luminosité (D signifie détecté et ND signifie non détecté).

Ces obstacles sont facilement détectables par les techniques optiques actives du Tom Pouce III dans toutes les conditions environnementales.

Remarquons que pour que les obstacles fins soient ressentis à grande distance lors d'un balayage rapide, il faut que la vibration du Tom Pouce aie une durée minimale laissant le temps au vibreur de s'activer et à l'utilisateur de percevoir clairement la vibration. En effet l'obstacle fin qui passe rapidement devant le faisceau laser peut avoir une durée de passage de quelques ms, bien inférieure au temps de mise en route du vibreur. La vibration du Tom Pouce III à une durée minimale de 300 ms, donc à une certaine distance et vitesse de balayage, un obstacle de quatre cm de large et de 50 cm de large peut être perçue avec la même largeur angulaire. Si on veut les différencier, il faut alors faire un balayage lent avec la canne. A vitesse de marche normale, la déviation nécessaire pour éviter un objet de quatre cm peut être la même que celle pour un objet de 50 cm ; la distinction n'a pas d'intérêt fonctionnel pour l'évitement de l'obstacle.

La figure 4.3 montre les performances de détection pour plusieurs ouvertures de porte (25, 50, 75, 100 et 125 cm), en fonction de la distance à l'ouverture (0,8, 1,7, 3,5, 5,5 et 11,5 m) et de la vitesse de balayage de la canne (0,8, 0,4 et 0,2 rad/s).

Considérons par exemple le point en haut à droite, qui correspond à une ouverture de 1,25 m vue à 11,5 m. Si la vitesse de balayage de la canne est de 0,2 ou 0,4 rad/s, l'ouverture est détectée. Cependant, si la vitesse de balayage était de 0,8 rad/s, l'ouverture de 1,25m n'est pas détectée.

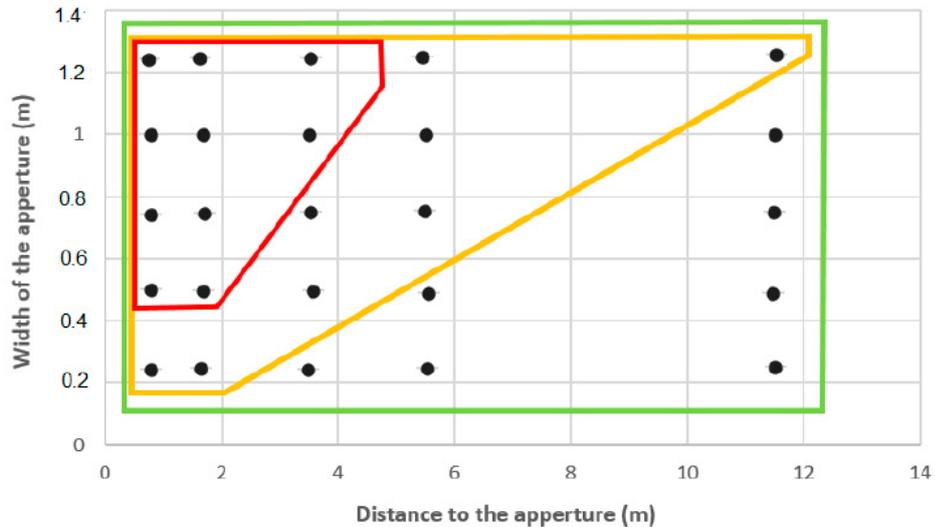


Figure 4.3 : Les performances des détections des ouvertures, dont les points noirs représentant les points de mesure à différentes distances. Le parallélogramme rouge contient des points indiquant les ouvertures détectées à 0,8 rad/s ; ceux à l'intérieur du parallélogramme jaune indiquant les ouvertures détectées à 0,4 rad/s et le parallélogramme vert indiquent une détection à pleine ouverture à 0,2 rad/s.

Détection des obstacles

Les conditions météorologiques différentes n'ont posé aucun problème avec ces obstacles. Cependant, il faut se rappeler qu'il a fallu 30 ans de développement et d'améliorations techniques pour atteindre ce résultat.

Les poteaux noirs fins sont difficiles à détecter par des méthodes optiques actives et il faut faire des compromis. Le capteur infrarouge (voir § II.2.3.3) ne détecte pas les obstacles noirs fins et le capteur laser ne fonctionne que pour des distances supérieures à un mètre. Par conséquent, il est normal que les poteaux étroits noirs ne soient pas détectés à 0,8 m. Dans les conditions normales d'utilisation de l'appareil le poteau noir doit être évité entre deux et quatre mètres d'anticipation. A 0,8m de distance il est trop tard pour anticiper le poteau noir que la canne aura sans doute déjà touché.

Détection des ouvertures

Il est plus facile de manière générale de voir les ouvertures avec une vitesse de balayage réduite de la canne. Il y a également une dimension minimale d'ouverture détectable à cause de la largeur du faisceau infrarouge (voir §II.3.2.2). En effet, il est inutile qu'une ouverture de 20 cm trop petite pour qu'un humain puisse la traverser sans difficultés, soit perçue comme un passage potentiel. C'est donc un avantage fonctionnel de ne pas détecter de si petits ouvertures à de grandes distances afin qu'un chemin plus large puisse être sélectionné à la place.

Cependant, nous avons constaté qu'avec un balayage de 50 cm de large de l'embout de la canne à une vitesse de 0,8 rad/s correspondant à une vitesse de marche normale de 3,8 km/h (voir le parallélogramme rouge sur la figure 4.3), la capacité à détecter les ouvertures était médiocre. Ainsi, une ouverture de 0,75 m correspondant à une porte ne sera pas détectée à 3,5 m. Néanmoins, les utilisateurs de cannes électroniques contournent cette difficulté. En effet, si la pointe de la

canne balaie la largeur des épaules (50 cm de large, un mètre en avant), la zone de détection en largeur avec une portée de quatre mètres est de deux mètres ; à 12 m, le balayage serait de six mètres de large. Cependant, la prise en compte de telles informations latérales sont la plupart du temps inutiles et fatigantes sur le plan cognitif. Par conséquent, les utilisateurs de canne électronique ont tendance à réduire le balayage de la canne à la largeur des pieds afin de limiter la perception latérale à grande distance. La largeur des pieds est d'environ la moitié de la largeur des épaules, ce qui produit un balayage de l'embout de la canne d'environ 25 cm de large.

La protection des épaules sera assurée par les capteurs et la protection des pieds par le bout de la canne. Par exemple, à 3,8 km/h, avec un balayage de 25 cm de large, la vitesse de balayage est divisée par deux, soit 0,4 rad/s. La détection d'ouverture correspondante à une vitesse de marche normale est illustrée par le parallélogramme jaune de la figure 4.3. Les ouvertures qui étaient trop petites pour le corps (par exemple, 0,25 m de large) ne pouvaient pas être détectées à 3,5 mètres, mais une ouverture de porte de 75 cm peut être détectée correctement à six mètres.

IV.1.2. Pointage locomoteur vers un objet distant

Ce protocole est inspiré des travaux menés par Loomis et ses collaborateurs (2002) sur la localisation d'un poteau dans l'espace à la vue et à l'audition. On a adapté ces travaux pour les transposer aux personnes non-voyantes équipées par un outil de substitution sensorielle. Il s'agit d'une tâche de pointage locomoteur "sans feedback" vers un objet distant par des sujets voyants selon les modalités vue et audition et par des sujets non-voyants selon les modalités audition et TP3. Le principe est le suivant : le sujet est placé en un point, un poteau est placé devant lui soit en face soit latéralement. La personne a cinq secondes pour analyser la position du poteau selon la modalité qu'elle utilise (vue, audition, TP3). Pour l'audition on frappe le poteau contre le sol. Après cinq secondes le poteau est retiré et la personne (voyante ou non voyante) doit se rendre (sans TP3 pour les non-voyants et sous bandeau pour les voyants) à la position du poteau qui a été retiré. On mesure l'écart en distance et angulaire par rapport à la position qu'avait le poteau.

L'hypothèse testée dans la présente expérience est que la canne électronique permet de construire une représentation spatiale égocentrée de l'emplacement d'un poteau avec une précision comparable à l'audition ou la vue.

1.2.1 Participants

Dans ce protocole nous avons recruté 12 personnes voyantes et 12 personnes non-voyantes de catégorie V (selon la classification de l'Organisation Mondiale de la Santé) utilisant la canne électronique Tom Pouce III dans leur vie quotidienne depuis au moins deux ans. Ils sont âgés entre 30 et 64 ans, il y a deux femmes et dix hommes. Tous les participants avaient les yeux bandés avec le "Goal fix Eclipse total" le masque noir occultant des jeux paralympiques.

Les personnes voyantes étaient recrutées à base de volontariat, une femme et onze hommes, âgés entre 26 et 60 ans.

Tous les participants non-voyants ont reçu au moment de leur prise en main de l'appareil (datant d'au moins deux ans pour les plus récents) 30 heures de formation à l'utilisation du matériel. Le cours a été donné par un instructeur de locomotion, spécialiste de la mobilité des déficients visuels. L'objectif de cette formation est de leur permettre de se déplacer en sécurité y compris dans des lieux inconnus (Ratelle A. et Couturier J.-A, 2019). Sur le plan technique le non-voyant apprend à synchroniser le balayage de la canne avec ses pas, à avoir une symétrie et largeur de balayage suffisamment grande pour se protéger. Par ailleurs on leur apprend dans le balayage de la canne à mettre en œuvre une seule articulation, la flexion extension du poignet, et à avoir toutes les autres articulations relâchées tout en étant fixes. Ainsi le pointage des Lidars de la canne situés sur la canne et dans l'axe de la canne se fait par la proprioception de la flexion extension du poignet uniquement. Le retour de l'information est la vibration située dans la main. Tous nos participants ont été recrutés sur une base volontaire. Nous avons demandé aux rééducateurs une liste d'utilisateurs qui accepteraient de participer à une étude comportementale de mobilité en utilisant leur canne électronique. Ils ont été sélectionnés au hasard sur la base de deux critères : ils doivent résider à Paris ou en banlieue parisienne pour la proximité au lieu des expériences et doivent avoir au moins deux ans d'expérience quotidienne avec la canne. Le protocole a été accepté par le comité d'éthique du Polethis de l'Université Paris-Saclay sous la référence CER-Paris-Saclay-2019-004. Les participants ont reçu un bon d'achat pour leur implication. Le tableau 4.3 fait état de la date du déficit visuel et de l'expérience à la canne électronique des différents participants non-voyants.

Participant	Date de naissance	Date de perte de la vue	Période d'utilisation de la canne simple	Période d'utilisation du Tom Pouce 1, 2 ou 3
1	1982	2012	1990 – 2009	2009 – 2021
2	1979	1983	1990 – 2015	2015 – 2021
3	1981	1983	1995 – 2001	2002 – 2021
4	1990	1990	2000 – 2015	2015 – 2021
5	1987	1997	1997 – 2014	2015 – 2021
6	1972	1985	1990 – 2010	2010 - 2021
7	1976	1976	1986 – 2001	2001 – 2021
8	1963	1963	1970 – 2010	2010 – 2021
9	1958	1980	1975 – 2013	2013 – 2021

10	1965	2006	1978 – 2019	2019 – 2021
11	1963	2016	2015 – 2016	2017 – 2021
12	1972	1980	1984 – 1994	2017 – 2021

Tableau 4.3 : Dans ce tableau on trouve la date de naissance, la date de la perte totale de la vue, la date d'utilisation de la canne blanche simple et la canne électronique Tom Pouce I, II ou III.

1.2.2. Matériel et Méthode

Un poteau est placé à l'une des six différentes positions possibles, inconnues de l'utilisateur.

Les six positions sont : à trois et cinq mètres en face du sujet (positions P2 et P5), à trois et cinq mètres orientées à 30° à gauche (P1 et P4) du sujet et à 30° à droite du sujet (P3 et P6). Le sujet est placé au point O, les épaules du sujet sont orientées suivant l'axe Oy, l'axe Ox est l'axe en face du sujet voir figure 4.4 ci-dessous. Les positions des poteaux sont marquées au sol pour faciliter leur positionnement par les investigateurs. Pour plus de détails sur la méthode de mesure voir l'annexe 1.

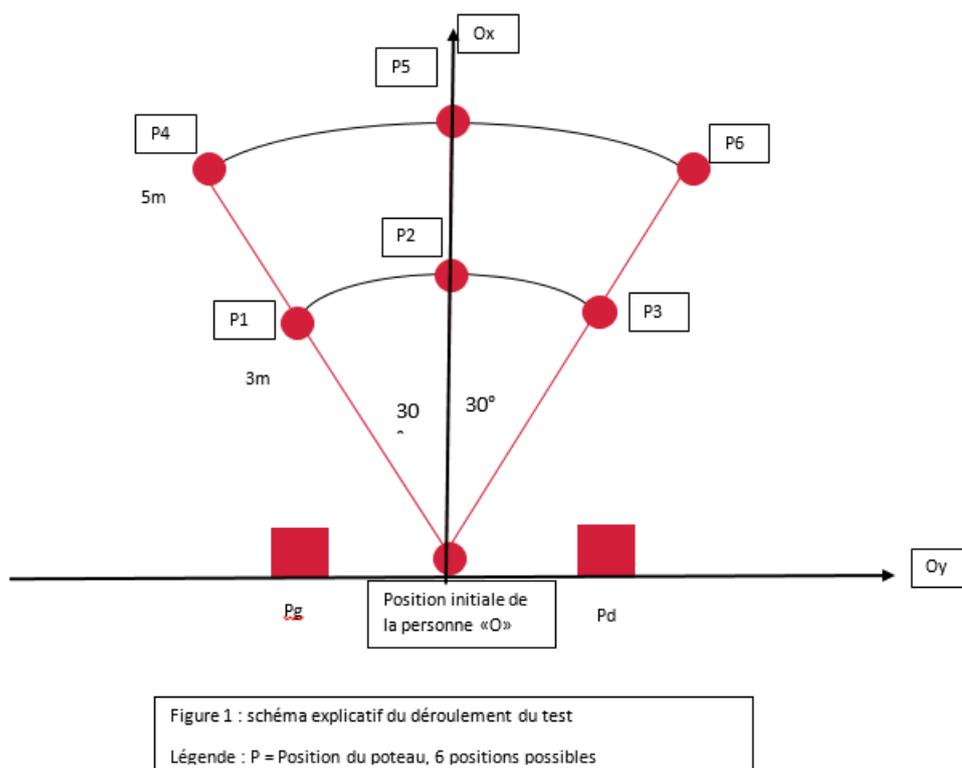


Figure 4.4 : schéma explicatif du déroulement du protocole, les axes Ox et Oy avec les six positions des poteaux.

Il a trois modalités : Audition, vue, TP3.

Les voyants ont tous commencé par la modalité auditive, puis ont fait la modalité visuelle. L'hypothèse était que la modalité visuelle allait être plus performante, et la prise de connaissance

visuelle du protocole allait pouvoir influencer la modalité auditive en faisant le lien entre le souvenir de la position visuelle des poteaux et leur bruit. Le protocole n'est donc effectivement pas optimisé pour les voyants. Ils ne sont cependant pas l'objet de l'étude mais juste un point de repère de comparaison. Pour les non-voyants comme il n'y a aucun moyen de savoir qu'elle va être la meilleure modalité entre audition et TP3, nous avons commencé aléatoirement soit par l'audition, soit par le TP3 et avons déroulé le test complet. Nous n'avons pas mélangé les modalités au cours des tests car ce n'est pas le même type de concentration demandé et cela devient vite déstabilisant de changer en permanence de modalité.

Tous les sujets non-voyants ont en permanence un bandeau dans tous les protocoles afin d'éviter qu'une perception lumineuse puisse influencer le résultat. Décrivons le protocole en détails pour les trois modalités :

- **Pour la vue**, le sujet voyant est placé dans sa position initiale sous bandeau avec un casque générant un bruit rose (moins désagréable que le bruit blanc) afin d'éviter la prise de repères potentiels auditifs, on lui retire le bandeau pendant cinq secondes afin qu'il puisse analyser la position du poteau. On lui remet le bandeau, on retire le poteau, et on lui demande d'aller se placer à la position du poteau. On mesure sa position avec un dispositif télémétrique (voir annexe 1) afin de pouvoir la comparer à celle du poteau en distance et direction. On raccompagne la personne à son point de départ en lui faisant faire un détour complexe, afin de lui faire perdre ses repères. Il y a 18 essais, trois par positions du poteau, les positions étant tirées au sort.
- **Pour l'audition**, le sujet voyant ou non-voyant sous bandeau est placé dans sa position initiale avec un casque générant un bruit rose. On lui retire le casque pendant cinq secondes afin qu'il puisse analyser la position du poteau par les quatre coups donnés au sol par le poteau. On lui remet le casque, on retire le poteau et on lui tape sur l'épaule pour lui demander d'aller se placer à la position du poteau. On mesure sa position via le dispositif télémétrique de l'annexe 1. On raccompagne la personne à son point de départ en lui faisant faire un détour complexe, afin de lui faire perdre ses repères. Il y a 18 essais, trois par positions du poteau, les positions étant tirées au sort.
- **Pour le Tom Pouce III**, le sujet non-voyant sous bandeau est placé dans sa position initiale avec un casque générant un bruit rose. On lui donne sa canne avec le TP3, on l'allume afin qu'il puisse analyser la position du poteau grâce à l'appareil. Au bout de cinq secondes on éteint le TP3. On retire le poteau et on lui retire la canne avec le TP3. On lui tape sur l'épaule pour lui demander d'aller se placer à la position du poteau. On mesure sa position via le dispositif télémétrique de l'annexe 1. On raccompagne la personne à son point de départ en lui faisant faire un détour complexe, afin de lui faire perdre ses repères. Il y a 18 essais, Trois par positions du poteau, les positions étant tirées au sort.

Pour toutes les modalités les utilisateurs ont un essai préalable pour être sûr d'avoir bien compris le protocole. La figure 4.5 ci-dessous représente la phase de perception du poteau à l'audition et au TP3.

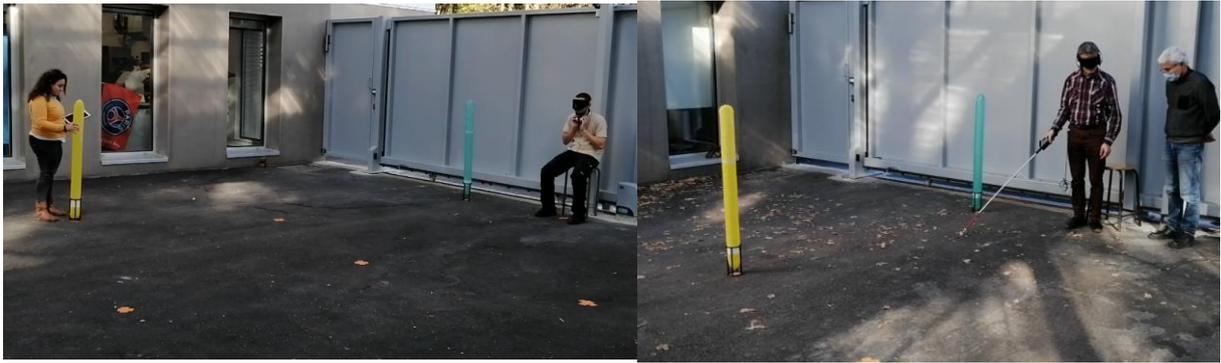
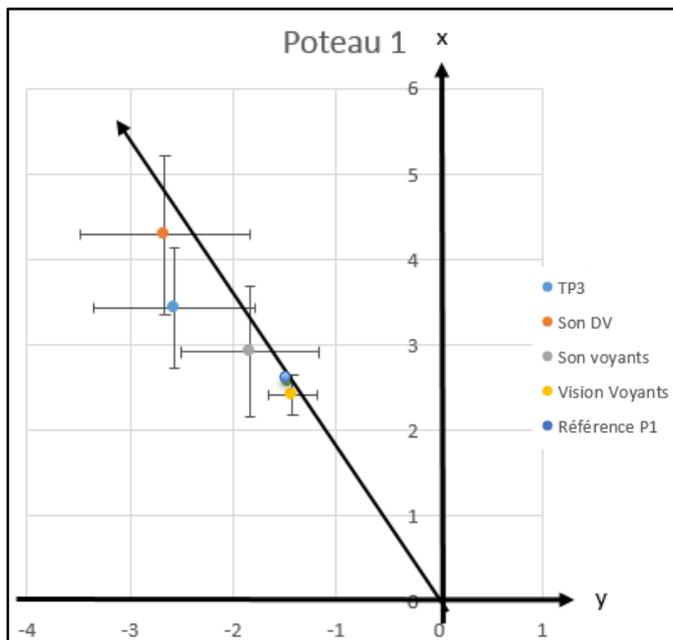


Figure 4.5 : Ces figures montrent comment les sujets localisent un poteau dans l'espace selon la modalité demandée. Pour la figure de gauche le sujet écoute le bruit du poteau qui est frappé contre le sol, pour la figure de droite le poteau est détecté avec le TP3.

1.2.3. Résultats et Discussion

D'après les réponses collectées du questionnaire rempli par les participants à la fin des études, sur le déroulement du protocole (cf. Annexe 2). Plus que 90% des participants voyants et non-voyants ont jugé l'étude comme trop longue à cause du grand nombre d'essais pour chaque modalité. Mais ils ont trouvé que le principe de l'étude était intéressant. Ensuite, plus de la moitié ont jugé que la durée de la prise de l'information avec le TP3 était insuffisante parce qu'il est nécessaire de balayer l'espace pour d'abord trouver la position, puis d'ajuster la portée pour évaluer la distance, ce qui nécessitait plus de temps. Pour finir les sujets non-voyants n'ont déclaré aucune gêne au port du bandeau noir, sauf les journées de forte chaleur.

Nous présentons d'abord les performances de pointage locomoteur pour le poteau P1, situé à 3m à 30° à gauche du point de départ de l'utilisateur, pour l'ensemble des sujets pour chaque modalité. Dans la figure 4.6 le graphe représentant l'espace dans le plan horizontal, les coordonnées du point de départ sont (0,0).



La position du poteau est représentée par un point vert. La performance moyenne pour chaque modalité est représentée par un point coloré avec l'intervalle de confiance à 95% en x (direction initiale du regard) et y (direction initiale des épaules) autour de la moyenne.

Figure 4.6 : Résultats des pointages locomoteurs pour la Position 1 avec les intervalles de confiance autour des points moyens, en x et en y. Ici, la référence (point bleu) est située à environ 1.5 m sur la gauche et 2.5 m devant le participant, ce qui fait une distance (hypoténuse du triangle rectangle) à la cible d'environ 3 m.

Les résultats pour la position P1 située à trois mètres sur la gauche du participant, illustrés dans la Figure 4.6, montrent que la modalité « à la vue » donne des performances quasi parfaites, non différentes significativement de la cible (l'intervalle de confiance inclut la cible). Ensuite la modalité « auditive » réalisée par les participants voyants donne une performance suggérant une surestimation de la distance en profondeur mais qui ne s'éloigne pas significativement de la cible. Par contre, les performances des non-voyants suggèrent une surestimation significative de la distance à la cible, plus importante pour le son que pour TP3. Les intervalles de confiance de chaque condition recouvrent la diagonale suggérant une représentation correcte de la direction de la cible.

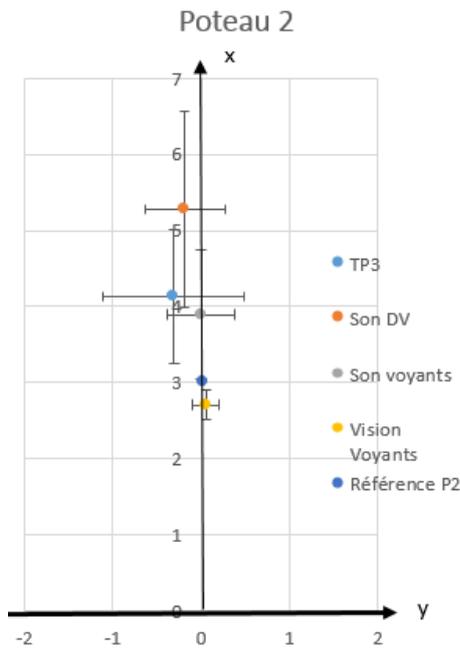


Figure 4.7 : Résultats des pointages locomoteurs pour la Position 2 située à trois mètres devant le participant.

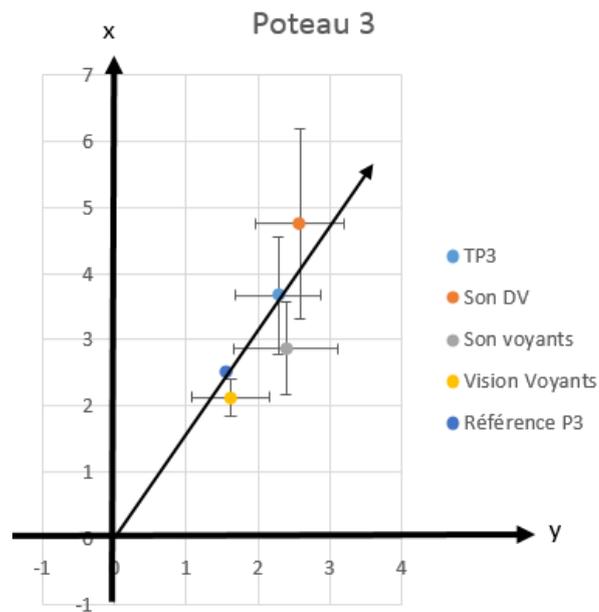
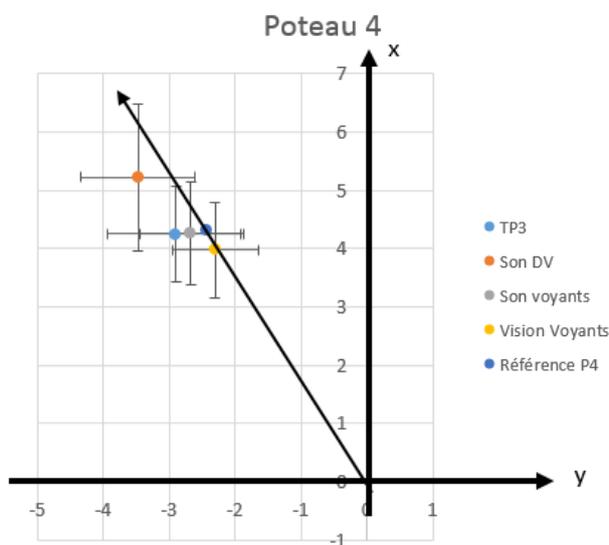


Figure 4.8 : Résultats pour la Position trois qui est la symétrie à droite de la Position 1 (cf. Figure 4.6).



Les performances pour P2 sont similaires à celles pour P1, hormis une sous-estimation significative en profondeur "à la vue", d'environ 30 cm, soit de 10% de la distance à la cible voir Figure 4.7. Les performances pour P3 sont quasiment similaires à celles pour P1 (cf. figure 4.8).

Figure 4.9 (ci-contre) : Résultats pour la position quatre situé dans l'axe de P1 mais à une distance de cinq mètres du participant.

Concernant les performances à la position P4 (cf. Figure 4.9), on remarque une bonne direction vers la cible pour toutes les modalités. Idem pour la performance en distance, hormis avec la modalité auditive chez les non-voyants qui montre une surestimation d'environ 1.3 m (soit d'environ 26%) de la distance à la cible (cinq mètres). Nous notons ici qu'il n'y a pas de surestimation de la distance pour un poteau à cinq mètres (le résultat est le même pour P5 et P6).

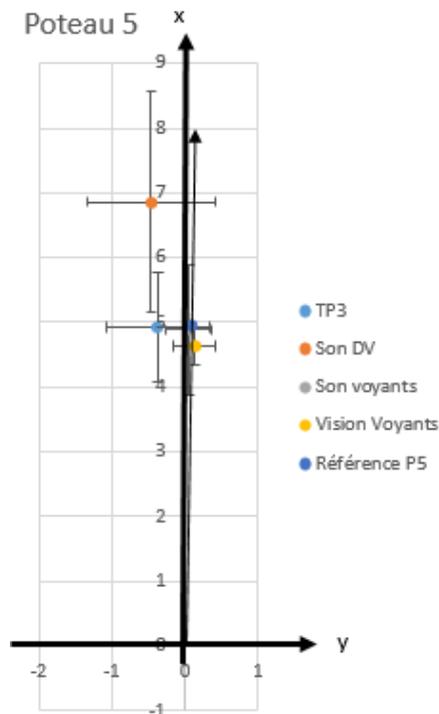


Figure 4.10 : Résultats pour la Position cinq située à cinq m en face du participant.

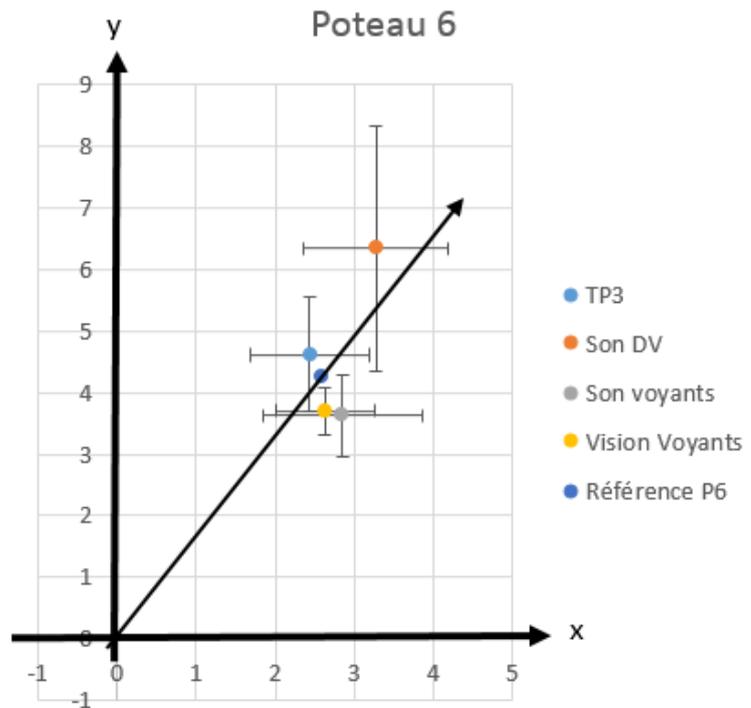


Figure 4.11 : Résultats pour la Position six qui est la symétrie à droite de la Position quatre (cf. Figure 4.9).

Les performances pour la position P5 (cf. figure 4.10) sont similaires à celles de P4, avec une surestimation significative d'environ 1.88 m (d'environ 37.5%) de la distance à la cible (cinq mètres) pour la modalité auditive chez les non-voyants. Les performances pour la position P6 (cf. figure 4.11) sont similaires à celles de P4, avec une surestimation significative d'environ 2.13 m (d'environ 43%) de la distance à la cible (cinq mètres) pour la modalité auditive chez les non-voyants.

Afin de compléter ces analyses descriptives sur les coordonnées des pointages locomoteurs, même si elles incluent des conclusions inférentielles permises par les intervalles de confiance (limitées par la non correction pour les comparaisons multiples), nous avons poursuivi ces analyses sur la base de calculs d'erreurs de performance (écart à la cible), en termes de distance en 2D et de déviation angulaire signée ou absolue. Des ANOVAs ont donc été menées sur ces trois variables dépendantes en considérant les facteurs *Modalité sensorielle* (TP3/Vision versus Audition) et *Position du poteau* (P1 à P6) en intra-sujet, et le facteur *Groupe* (voyants versus non-voyants) en inter-sujets. Nous avons choisi de considérer que le TP3 donnait accès à une

information optique de l'emplacement de la cible équivalente (certes appauvrie) à la vision des voyants, du fait du laser -- même si a) la direction du pointage du laser est fournie au cerveau via la proprioception de la flexion-extension du poignet, et b) le retour sensoriel est haptique par une vibration -- afin de faire la comparaison des performances inter-groupes.

L'ANOVA sur les erreurs 2D en distance a montré un effet significatif de la *Modalité sensorielle*, $F(1, 21) = 16.74, p = 0.00052$, avec de plus grandes erreurs pour l'Audition ($M = 1.81$ m) que pour TP3/Vision ($M = 1.07$ m). Par ailleurs, l'effet de la *Modalité sensorielle* variait marginalement avec la Position du poteau l'effet $F(5, 105) = 2.08, p = 0.074$. Même si cette interaction (illustrée dans la Figure 4.12) n'était que marginale, nous avons souhaité comparer l'effet de la *Modalité sensorielle* sur l'erreur en distance à chaque position de poteau en faisant des tests t de Student appariés corrigés pour les comparaisons multiples, en plaçant le seuil de significativité à $\alpha = 0.05/6 = 0.008$. Ces comparaisons ont mis en évidence un effet significatif de la *Modalité sensorielle*, dans le même sens que l'effet moyen, pour toutes les positions ($ps < 0.003$) sauf P4 ($t(22) = 1.54, p = 0.13$).

Enfin, la performance variait significativement avec le groupe, $F(1, 21) = 10.52, p = 0.0039$, avec des erreurs de distance plus importantes chez les participants aveugles ($M = 1.87$ m) par rapport aux voyants ($M = 1.01$ m). Les figures précédentes sur les coordonnées des pointages locomoteurs suggèrent que cet effet de groupe est dû aux surestimations des distances à la cible dans la condition auditive chez les non-voyants pour les positions éloignées (cinq mètres) et dans les deux modalités pour les positions plus proches (trois mètres). Cette ANOVA n'a pas montré d'effet significatif des autres sources de variances ($ps > 0.12$).

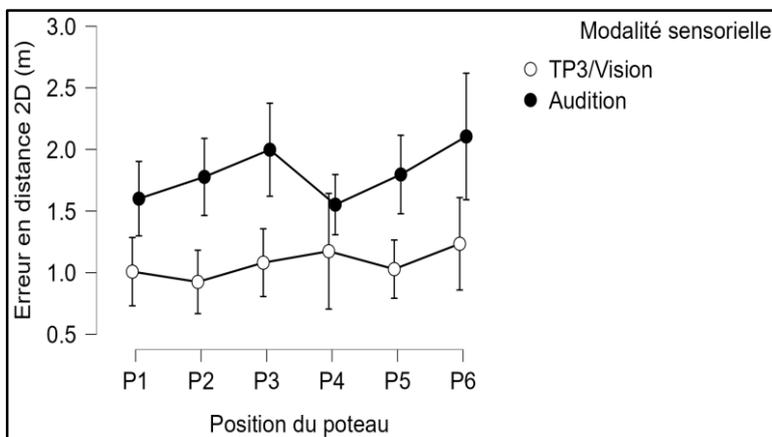


Figure 4.12 : Erreur en distance pour chaque Position de poteau en fonction de la Modalité sensorielle moyennée entre les voyants et les non-voyants (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne).

L'ANOVA sur les erreurs (déviations) angulaires signées a montré un effet significatif, $F(5, 105) = 7.11, p < 0.0001$ de la *Position du poteau* (cf. Figure 4.13). Même si des tests post-hocs avec correction de Bonferroni montrent des différences d'erreur entre poteaux (P1 p/r P3 et P6; P2 p/r P3; P3 p/r P4 et P5), les comparaisons des erreurs par rapport à zéro, une fois corrigées pour les comparaisons multiples (avec $\alpha = 0.05/6 = 0.008$), ne montrent pas de déviation angulaire à zéro significative (par ex., pour P1, $t(22) = 2.62, p = 0.015 > 0.008$, et pour P3, $t(22) = 2.14, p = 0.044 > 0.008$).

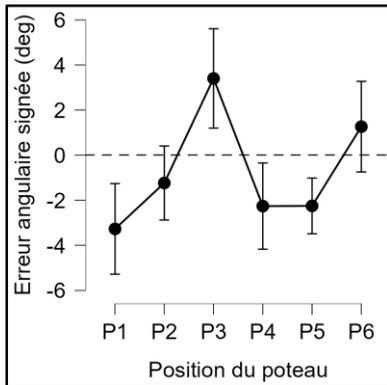


Figure 4.13 (ci-contre) : Erreur angulaire signée moyenne pour chaque Position de poteau (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne). Il s'agit des données moyennées sur tous les sujets et toutes les modalités.

Par ailleurs, l'ANOVA a montré que les participants non-voyants font des erreurs angulaires signées ($M = -3.17^\circ$) significativement différentes de celles des participants voyants ($M = 1.72^\circ$), $F(1, 21) = 6.15, p = 0.02$. Cependant, force est de constater que ces erreurs sont en moyenne très faibles (moins de 4° d'écart à la direction de la cible).

Enfin, l'effet de la *Modalité sensorielle* sur l'erreur angulaire signée variait significativement en fonction du groupe, différemment selon la *Position du poteau*, $F(5, 105) = 3.797, p = 0.0033$, comme l'illustre la Figure 4.14. Afin de comprendre l'origine de cette interaction à trois facteurs, des sous-ANOVAs ont été faites afin de vérifier pour quelle *Position du poteau* l'interaction *Modalité sensorielle x Groupe* s'avérait significative. Ce fut le cas uniquement pour P1, $F(1, 21) = 6.45, p = 0.019$, mais des comparaisons post-hoc avec correction de Bonferroni n'ont pas mis en évidence de différence significative entre moyennes. De manière descriptive, en regardant la figure ci-dessous, il semble que l'effet de la modalité sensorielle soit le même pour les deux groupes sauf dans le cas P1, mais cette différence n'est pas significative. Cette ANOVA n'a pas montré d'effet significatif des autres sources de variances ($ps > 0.24$).

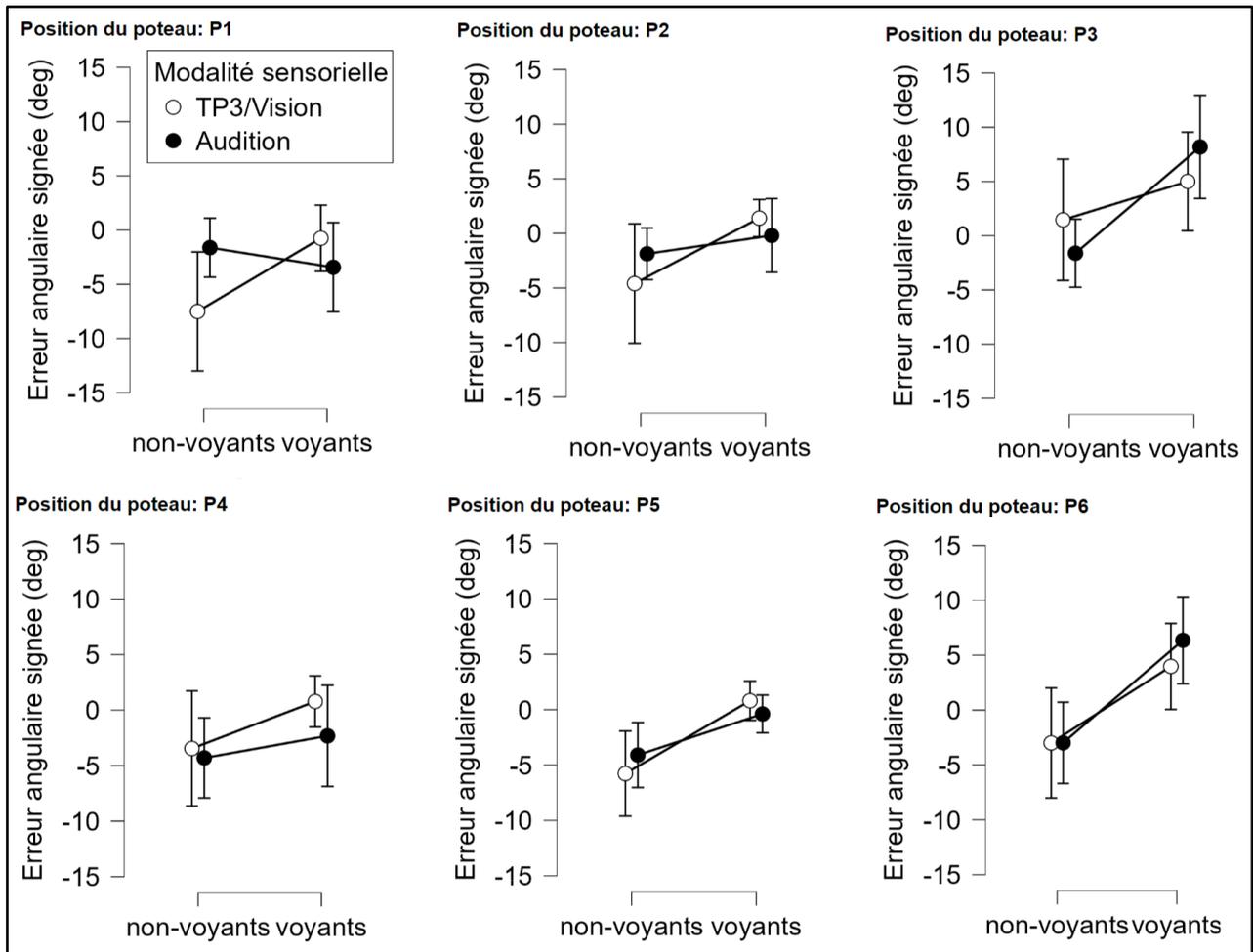
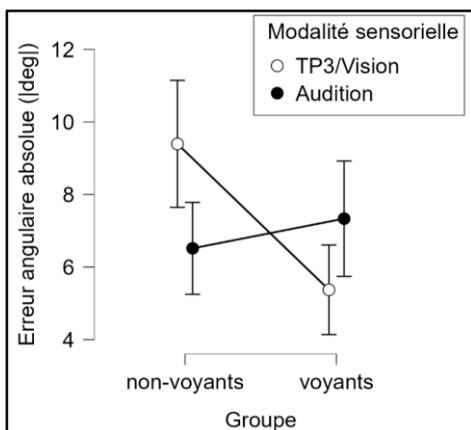


Figure 4.14 : Effet d'interaction Position du poteau x Modalité sensorielle x Groupe sur l'erreur angulaire signée (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne).

L'ANOVA sur les erreurs (déviations) angulaires absolues a montré des erreurs significativement plus importantes chez les non-voyants ($M = 7.9^\circ$) que les voyants ($M = 6.3^\circ$), $F(1, 21) = 4.54$, $p = 0,045$. Bien que cet effet Groupe soit significatif, la différence reste descriptivement faible, à savoir environ 1.5° . Par ailleurs, nous avons constaté que l'effet de la *Modalité sensorielle* sur l'erreur angulaire absolue variait significativement avec le *Groupe*, $F(1, 21) = 11.81$, $p = 0.0025$, comme l'illustre la Figure 4.15. Les tests post-hoc avec correction de Bonferroni montrent que



l'interaction est due à des erreurs significativement plus importantes pour TP3 (chez les non-voyants) par rapport à Vision (voyants), $p = 0.002$, alors que les performances des deux groupes ne diffèrent pas pour l'audition, $p = 1$.

Figure 4.15 : Effet d'interaction Modalité sensorielle x Groupe sur l'erreur angulaire absolue (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne).

Enfin, l'ANOVA a mis en évidence une interaction significative *Position du poteau x Groupe*, $F(5, 105) = 3.07$, $p = 0,013$, illustrée dans la Figure 4.16. Des tests *t* de Student de groupes indépendants corrigés pour les comparaisons multiples ont été menés afin de tester l'effet du *Groupe* à chaque *Position de poteau*, en plaçant le seuil de significativité à $\alpha = 0.05/6 = 0.008$. L'effet *Groupe* ne s'est avéré significatif que pour P5, avec des erreurs plus importantes chez les non-voyants ($M = 8.1^\circ$) que chez les voyants ($M = 3.7^\circ$), $t(21)=4.33$, $p = 0.0003$. Ce dernier résultat est cohérent avec les déviations latérales moyennes observées uniquement chez les non-voyants à la Figure 4.16. Cette ANOVA n'a pas montré d'effet significatif des autres sources de variances ($ps > 0.14$).

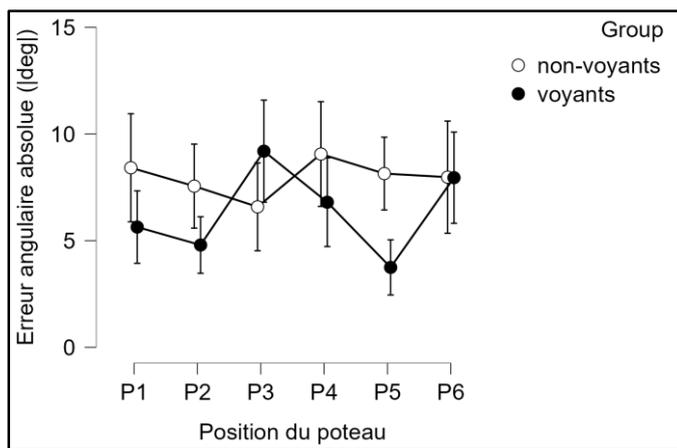


Figure 4.16 : Effet d'interaction Position du poteau x Groupe sur l'erreur angulaire absolue (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne).

En résumé, cette expérience met en évidence les faits suivants dont allons maintenant discuter :

1. La direction est correctement perçue par les voyants et les non-voyants dans toutes les modalités.
2. Il y a une surestimation systématique de la distance pour les non-voyants à l'audition pour toutes les positions des poteaux
3. Il y a une surestimation de la distance pour les non-voyants au Tom Pouce III pour les poteaux situés à trois mètres, mais l'estimation de la distance devient correcte pour les poteaux situés à cinq mètres.

Pour le premier point, l'élément nouveau apporté par notre expérience est que le pointage locomoteur en direction par l'appareil Tom Pouce III est de qualité équivalente à l'audition. Par contre, les non-voyants font des erreurs angulaires absolues significativement plus importantes avec le TP3 que les voyants à la vue ($p=0,002$, figure 4.15), même si l'erreur reste acceptable puisque l'intervalle de confiance recouvre l'axe passant par la cible pour quatre poteaux sur les six (cf. Figure 4-6 à 4-11), alors même que ces intervalles ne sont pas corrigés pour les multiples comparaisons. S'ils l'avaient été, alors on aurait utilisé un intervalle à 99.2% (car $\alpha = 0.05/6 = 0.008$) qui aurait inclut cet axe pour chaque poteau.

Analysons les conditions à respecter dans chaque modalité pour faire un bon pointage locomoteur.

Dans les trois modalités : visuelle, auditive et TP3, il est nécessaire d'avoir un démarrage de la marche sans repères externes dans la direction effectivement perçue, et une ligne droite correcte

toujours sans repères externes (ce qui était aussi le cas des voyants qui avaient un bandeau au moment de rejoindre la position du poteau). Il y a donc plusieurs causes à l'erreur angulaire : mauvaise perception de la direction, mauvaise prise de direction et défaut de ligne droite sans repères extérieurs. Nous ne pouvons que constater le résultat final sans avoir le moyen de différencier de manière objective ces trois causes pour la vision et l'audition.

Pour le TP3, par contre, nous connaissons par les retours des instructeurs de locomotion ayant fait la rééducation sur plus d'un millier de personnes, la principale cause de l'erreur angulaire de prise de direction. L'utilisateur, pour pointer, doit utiliser uniquement la flexion extension du poignet avec un appareil tenu verticalement (Farcy, R; 2020) et figure 4.17 ci-dessous.



Figure 4.17a : Gros défaut de verticalité par pronation du poignet (à gauche) ; léger défaut de verticalité par supination inconsciente (à droite)

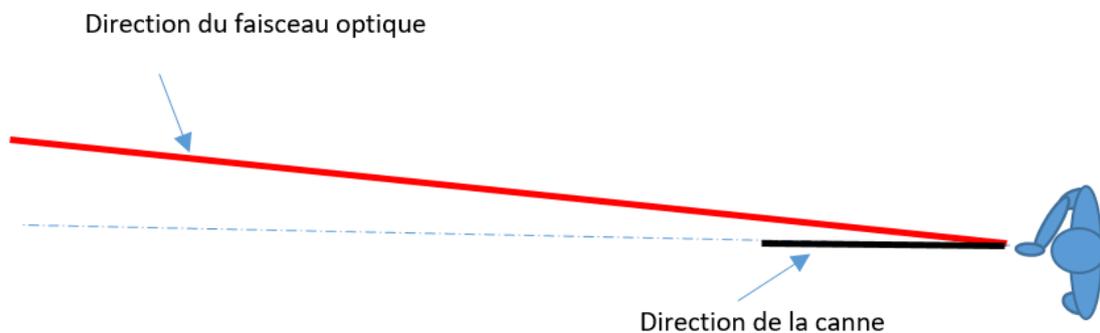


Figure 4.17b : Conséquence d'un défaut de verticalité dans le cas d'une pronation du poignet vers la droite : le laser pointe dans une direction différente de celle de la canne, ce qui introduit un angle d'erreur systématique sur la direction des informations de l'appareil reçues par le sujet.

Les os métacarpiens doivent être en position verticale de manière permanente au cours du balayage et la main centrée au milieu du corps pour avoir un pointage optimal par proprioception de la flexion extension du poignet. Une pronation involontaire et inconsciente du poignet (courante chez le débutant) comme sur l'image de gauche, entraînera un angle de plusieurs dizaines de degrés entre l'axe de la canne et le pointage de l'appareil. Tout pointage locomoteur exact et donc évitement correct d'obstacle est impossible. Cette verticalité des métacarpiens et le centrage de la canne est difficile à obtenir chez certaines personnes. Même si les positions de tenue sont bonnes en fin de formation, il y a des dérives avec le temps. Pour deux sujets

notamment après les tests, nous avons dû refaire quelques exercices de base pour leur faire corriger une légère pronation inconsciente qui s'était installée avec le temps. Certains sujets ont des défauts de centrage de l'appareil, mais arrivent à compenser et à faire un pointage juste, tant que le défaut de centrage n'est pas excessif, typiquement une main décalée d'un quart de la largeur du corps du côté de la main qui tient la canne.

Cette cause de déviation due à la mauvaise perception de la direction est en général largement supérieure aux deux autres : erreur de prise de direction lors du départ, mauvaise ligne droite. La correction de cette erreur donne en général des effets immédiats sur la qualité de la locomotion. Il existe des cas assez rares où le problème est la prise de direction dans l'initiation du mouvement, ou dus à une très mauvaise ligne droite, ces problèmes sont beaucoup plus longs et difficiles à corriger que les pronations ou supinations inconscientes. Il est très probable que la qualité de pointage des non-voyants au TP3 soit due à la qualité du maintien vertical de l'appareil, sujet dépendant. On peut cependant constater que cette possibilité d'erreur n'est pas présente à un stade fonctionnellement gênant chez les utilisateurs aguerris qui participent à l'étude.

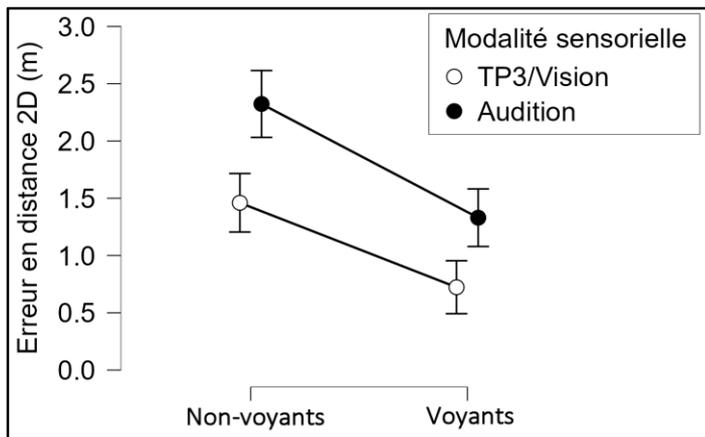
Pour le second point il y a une surestimation de la distance à la modalité auditive pour les non-voyants, présente aussi chez les voyants mais de manière beaucoup plus atténuée. Les performances en distance dégradées pour la modalité auditive chez les non-voyants par rapport aux voyants semblent contre-intuitives par rapport à la capacité d'écholocalisation souvent attribuée aux non-voyants dans la littérature. Ce résultat n'est cependant pas à confondre avec les possibilités d'exploitation de l'écholocalisation qui est plus développée chez les sujets non-voyants (Strelow, 1982). Ici il ne s'agit pas de l'exploitation de l'écholocalisation pour se diriger mais de la localisation précise d'un objet générant un bruit (par chute par exemple). Nos résultats suggèrent que l'expérience visuelle est importante afin de traduire les stimulations auditives en une perception spatiale. Même si ces résultats vont dans le sens d'une hypothèse cognitive de notre perception de l'espace, la faible performance chez les non-voyants peut être due à l'absence de mouvement qui serait requise pour percevoir l'emplacement de l'objet sur la base des entrées sensorielles auditives. Peut-être que si les non-voyants avaient été actifs (par exemple, petit déplacement latéral) durant la stimulation auditive, de façon à créer un parallaxe auditif (Genzel et al., 2018), auraient-ils eu des performances équivalentes aux voyants ? Par ailleurs (Finocchietti & Gori 2015) montre que la perte de la modalité visuelle gêne le développement de la modalité auditive. (Finocchietti & Gori 2017) montre également que la précision de la spatialisation auditive peut être améliorée chez des non-voyants congénitaux par des exercices couplant deux modalités sensorielles proprioception et audition. Les résultats que nous avons obtenus sur la localisation auditive, qui sont périphériques au thème central de notre étude, sont cohérents avec ces travaux qui ont étudié la question de manière beaucoup plus détaillée que nous.

Pour expliquer le troisième point qui pourrait sembler surprenant : une surestimation de la distance à trois mètres et une bonne évaluation en moyenne à cinq mètres, nous devons revenir sur la stratégie utilisée spontanément par les sujets pour percevoir la position de la cible avec le TP3. La personne est à l'arrêt et balaie le faisceau lumineux solidaire de l'axe de sa canne angulairement d'environ 60° à droite puis à gauche (ou l'inverse). Dès qu'elle a perçu la localisation angulaire du poteau par une vibration intervenue dans une certaine direction, elle re pointe sa canne électronique dans cette direction pour confirmer et affiner la position

angulaire. La précision de l'angle n'est limitée que par la finesse de la proprioception de l'individu et la justesse de son schéma corporel (Paillard, 1980) dans un repère géocentré qui lui permet de se diriger effectivement dans la direction précédemment pointée quand il n'y a plus le signal du TP3. Concernant la distance, les sujets ne connaissant pas la distance à l'obstacle ont utilisé spontanément la plus grande portée de six mètres. Dans cette configuration, ils ont une vibration haptique granuleuse pour les distances inférieures à deux mètres et lisse entre deux et six mètres. Les obstacles étaient situés à plus de deux mètres (trois et cinq mètres), à ce stade ils pouvaient juste savoir que les distances étaient comprises entre deux et six mètres. Les utilisateurs (à l'exception de ceux qui ont perdu du temps dans l'exploration suite à une maladresse temporaire) ont eu le temps, pendant les cinq secondes allouées à l'exploration, une fois l'objet localisé en direction, de réduire la portée de l'appareil à quatre mètres pour savoir si l'objet était entre deux et quatre mètres ou quatre et six mètres. Dans cette stratégie en position statique la précision en profondeur fournie par l'appareil est d'une résolution de deux mètres. Si l'utilisateur, ignorant la vraie distance et sachant qu'elle était entre deux et quatre mètres, prenait une décision au hasard, on aurait dû trouver en moyenne une profondeur proche de trois mètres qui était justement celle de la cible. A la place on a eu une surestimation de la distance la plaçant à environ quatre mètres en moyenne qui est la distance maximale possible. La "surestimation" reste dans l'intervalle deux - quatre mètres des possibles en fonction de la précision fournie par l'appareil. Pourquoi les utilisateurs ont-ils choisi de spatialiser le poteau à quatre mètres (pour P1, P2, P3 la position moyenne des non-voyants est très proche de quatre mètres) plutôt qu'à deux mètres, ou trois mètres qui est la moyenne dans le doute ? Cela est très probablement dû aux mécanismes d'évitement d'un obstacle et de reprise de la trajectoire. Si on surestime la distance à un obstacle comprise entre deux et quatre mètres à une distance de quatre mètres dès que l'on perçoit l'obstacle et que l'on commence à l'anticiper, on a le temps de l'éviter et on reprendra sa trajectoire un peu après l'obstacle (deux mètres après au pire, si l'objet était à deux mètres et supposé à deux mètres), chose tout à fait correcte sur le plan fonctionnel. Par contre, si on sous-estime la distance dans un évitement d'obstacle (on suppose qu'il est à deux mètres au lieu de quatre mètres en réalité), on va avoir tendance à reprendre sa trajectoire avant d'avoir franchi l'obstacle, et se retrouver face à l'obstacle, ce qui est un évitement raté, fréquent chez les débutants en formation. Il est donc logique que les utilisateurs spatialisent à quatre mètres, car il s'agit de la spatialisation qui en terme d'évitement est fonctionnelle pour un obstacle que l'appareil signale dans la plage d'incertitude deux- quatre mètres. Se rabattre trop tôt est une erreur systématique des débutants à la canne électronique.

Pour les positions des poteaux situés à cinq m de distance P4, P5, P6, on a bien la moyenne des distances possibles situées entre quatre et six mètres, c'est à dire cinq mètres. Cela ne doit pas être interprété comme une bonne perception des distances à cinq mètres meilleure qu'à trois mètres, car si le poteau avait été à six mètres ou à un peu plus de quatre mètres les utilisateurs auraient eu la même position d'arrêt car ils n'ont aucune information leur permettant d'être plus précis. Et auraient donc surestimé ou sous-estimé la distance au poteau. Cela suggère que dans l'usage quotidien la portée de six mètres n'est pas gérée de la même façon au niveau de la spatialisation des objets que celle de quatre mètres. En effet l'anticipation d'un obstacle courant de largeur modérée (personne par exemple) ne commence pas à plus de quatre mètres, même pour les voyants. On se base sur les observations passées de l'équipe (non publiées) sur la

comparaison des trajectoires des voyants et des non-voyants au Forum des Halles à Paris en heure de pointe, hors période de soldes. Dans les trottoirs encombrés nécessitant des évitements fréquents la portée privilégiée des utilisateurs est de quatre mètres. La portée de six mètres est en fait plus imprécise en profondeur, puisque la vibration haptique “lisse” du TP3 se trouve entre deux et six mètres. Par contre, elle offre beaucoup plus de champ de perception (distance que multiplie l’angle de balayage de la canne et faisceaux infrarouges de protection plus larges, voir figure 1.29 § II.2.3.3). Cette portée de six mètres est plus consacrée aux zones calmes et dégagées où le besoin essentiel est la prise de repères à distance plus que l’évitement, afin de bien se centrer dans le passage large et bénéficier d’une trajectoire confortable loin des obstacles. Il pourrait alors sembler logique qu’il n’y ait pas à ce moment de surestimation de la distance liée



au processus d’évitement dans la spatialisation faite par l’utilisateur. Ce résultat serait certainement à confirmer par des expériences complémentaires qui restent à imaginer.

Figure 4.18 (ci-contre) : Illustration de l’interaction non significative entre Groupe et Modalité sensorielle ($F(1, 21) = 0.507, p = 0.484$). Les barres d’erreur sont des intervalles de confiance à 95% autour de la moyenne.

En conclusion, les résultats valident partiellement notre hypothèse initiale que la canne électronique permet de construire une représentation spatiale égo-centrée de l’emplacement d’un poteau avec une précision comparable à l’audition ou la vue. En effet, autant la perception égo-centrée de la direction à un poteau semble fonctionnellement comparable à la vue et à l’audition, ce n’est pas le cas de la perception des distances. Comme l’illustre la Figure 4.18 ci-dessus, les résultats montrent un effet additif de la perte de la cécité (effet du Groupe ≈ 85 cm) et de la modalité sensorielle (effet ≈ 75 cm) sur l’estimation des distances, qui est en fait une surestimation.

IV.1.3. Choix de passage

Dans cette étude on demande à la personne d'identifier un passage parmi plusieurs possibles. Les différents passages sont identifiés par des objets de différentes largeurs angulaires. C'est une situation qui peut être rencontrée dans la vie courante, où le bon passage à prendre peut être caractérisé par des structures de largeurs particulières servant de repères.

Les hypothèses sont les suivantes : la canne électronique permet une meilleure identification d'un passage par rapport à la canne blanche ; l'identification du passage à la canne électronique est comparable à celle à la vue.

1.3.1. Participants

On a inclus les mêmes personnes non-voyantes que pour le protocole de pointage locomoteur. Le protocole a été accepté par le comité d'éthique du Polethis de l'Université Paris-Saclay sous la référence CER-Paris-Saclay-2021-010. L'expérience a été réalisée avec 12 sujets non-voyants et 12 sujets voyants selon les trois modalités différentes expliquées comme suit :

1. Pour les participants non-voyants sous bandeaux :
 - Canne électronique Tom Pouce III.
 - Canne blanche.
2. Pour les participants voyants :
 - A la vue.

1.3.2. Matériel et Méthode

Le but de l'étude est de comparer la capacité à prendre le passage demandé par l'investigateur parmi quatre passages. Nous avons demandé aux participants pour tous les essais lors de l'expérience de se positionner au même point de départ « point de départ du sujet » comme nous le voyons dans la figure 4.19 ci-dessous. Il y avait trois obstacles de largeurs différentes à quatre mètres des participants alignés devant eux. Ils sont matérialisés par des porte-manteaux : simples (un manteau de 60 cm de large et 1,2 m de haut), doubles (deux manteaux côte à côte, 120 cm de large) et triples (trois manteaux côte à côte, 180 cm de large). Tous les passages font un mètre de large. Ensuite, nous demandons au sujet, par exemple, "de laisser l'obstacle double à sa droite". A noter que la consigne et les positions des obstacles sont modifiées à chaque essai.

Les paramètres fixes tout le long de l'expérience sont : le nombre d'obstacles qui est de trois (un de 60cm, un de 120cm et un de 180cm de large), l'espacement d'un mètre entre les obstacles et la distance entre le point de départ et la ligne d'obstacles qui est de quatre mètres. Le paramètre aléatoire entre chaque essai est l'ordre d'apparition de gauche à droite des trois obstacles. Par exemple dans le premier essai l'obstacle de 60cm de large est à gauche, celui de 180cm de large est au milieu, celui de 120cm de large est à droite. L'essai suivant on a à gauche l'obstacle de 120cm de large, au milieu celui de 60cm et à droite celui de 180cm de large etc.

Nous mesurons le choix correct ou incorrect du passage indiqué par l'investigateur et si le passage a été pris avec ou sans contact avec les obstacles.

Les consignes données aux participants étaient les suivantes :

- Attendez que l'instruction soit donnée par l'investigateur. A titre d'exemple : laissez l'obstacle double à droite.
- Trouvez et prenez le passage requis (s'il n'est pas trouvé, cela affecte le score du test).
- Franchir le passage sans collision avec les obstacles (tout contact affecte les résultats du test).
- Il y a 10 essais pour chaque modalité. Les positions des obstacles sont modifiées à chaque essai.
- En cas de contact ou de faux passage, l'essai ne sera pas répété.
- Le test se termine à la fin du dixième essai.



Figure 4.19 : On voit un participant non-voyant au point de départ en train d'analyser les obstacles avec le Tom Pouce III pour franchir le passage demandé par l'investigateur.

L'investigateur demande au sujet de franchir le passage demandé dans la consigne (comme par exemple laisser l'obstacle simple à sa gauche). Nous mesurons ensuite, le temps pendant lequel le sujet exécute la tâche jusqu'à ce qu'il franchisse le passage.

Nous avons d'abord analysé le taux de réussite pour prendre le passage requis, sans tenir compte de la fluidité de la trajectoire, des collisions et des contacts latéraux. Nous recensons les frôlements et les collisions séparément. Le matériel utilisé pour analyser l'action est un enregistrement vidéo d'un investigateur qui suit la personne en étant décalé sur le côté. Ensuite,

nous avons défini une échelle de test qui mettait en évidence la capacité de la personne à prendre le bon passage sans contact. Nous l'avons défini comme suit (cf. figure 4.20) :

- Franchir le passage demandé sans toucher les obstacles donne deux points (trajectoire illustrée par le trait orange pointillé) ;
- Franchir le passage demandé en ayant un contact latéral avec la canne ou le corps en étant dans l'axe de passage donne un point (trajectoire illustrée par le trait vert pointillé)
- Franchir le mauvais passage ou effectuer une collision frontale avec un obstacle (trajectoire illustrée par le trait ligne violet ou le trait rouge) donne zéro point.

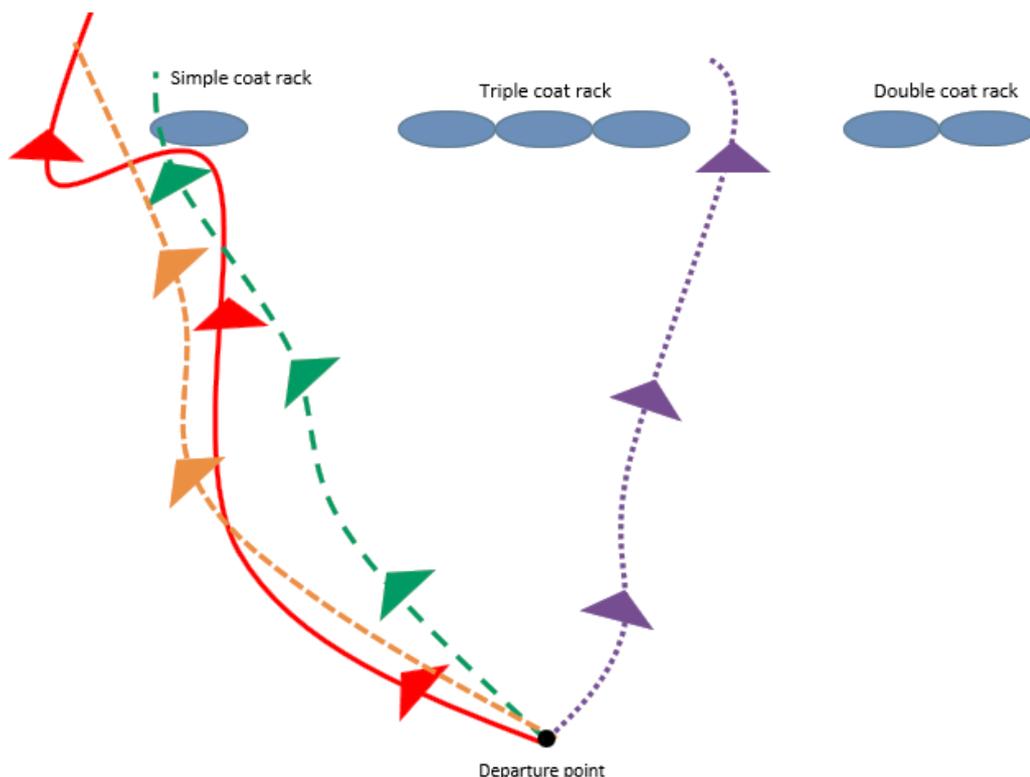


Figure 4.20 : la consigne était de franchir le passage imposé « en gardant l'obstacle simple à droite » : sans aucun contact le sujet obtient deux points (ligne orange) ; ayant un contact latéral le sujet a obtenu un point (ligne verte) ; ayant une collision frontale avec l'obstacle le sujet a obtenu 0 point (ligne rouge) et lorsque le passage requis n'est pas franchi le sujet a obtenu zéro (ligne violette).

Les variables dépendantes dans ce protocole sont : l'exactitude du choix du passage franchi et le temps pour effectuer l'action.

1.3.3. Résultats et Discussion

Les réponses des participants non-voyants au questionnaire de fin du protocole (cf. Annexe 3) ont été les suivantes : la durée de l'étude était supportable, les consignes étaient de difficulté facile à moyenne. Un sujet a trouvé que les questions étaient difficiles à comprendre au début de l'expérience. Ils ont apprécié le côté ludique d'inspection de l'espace avec le TP3. Plus de 80% des

sujets ont trouvé que l'exercice fait partie de la vie quotidienne par exemple : sur les trottoirs avec les terrasses de café, des poteaux, des vélos ou motos stationnées.

Proportion de bons choix

Dans cette section, nous avons analysé la capacité à effectuer le passage requis en fonction de la modalité demandée. En utilisant la proportion de choix corrects comme variable dépendante, quel que soit le nombre de collisions avec le passage. Un *test t de Student* pour des groupes indépendants a montré que les participants aveugles utilisant le TP3 avaient des performances similaires à celles des sujets voyants, $t(22) = 0.128, p = 0,899$. En revanche, un test t apparié a montré que les performances des participants aveugles étaient significativement dégradées lorsqu'ils utilisaient la canne blanche plutôt que TP3, $t(11) = 3.51, p = 0.0049$. Dans le tableau 4.4 ci-dessous on voit la probabilité moyenne de choix correct et l'erreur-type pour chaque modalité.

Dans les trois modalités : non-voyants à la canne électronique (TP3), non-voyants à la canne blanche et voyant à la vue ; les probabilités d'un choix correct sont respectivement de 0,94 ; 0,78, 0,93 bien au-dessus de la probabilité de chance qui est de 0,25.

	Non-voyants (TP3)	Non-voyants (cane blanche)	Voyants (vision)
Probabilité moyenne de choix correct	0.94	0.78	0.93
Ecart type	0.1	0.1	0.2

Tableau 4.4 : Résultats des participants voyants à la vue et non-voyants à la canne électronique et la canne blanche.

Le score du test

On présentera ici les résultats du test dont le barème était défini dans la partie précédente (IV.1.3.2).

Un test *t* de Student pour des groupes indépendants a montré que les participants non-voyants utilisant le TP3 avaient des performances similaires (voir tableau ci-dessous) par rapport aux sujets voyants, $(t(22) = 0.133, p = 0,895)$. En revanche, un test t apparié a montré que les performances des participants non-voyants étaient significativement très dégradées (voir tableau ci-dessous) lorsqu'ils utilisaient la canne blanche plutôt que TP3, $t(11) = 17.62, p < 0.0001$. Comme illustré dans le tableau 4.5 ci-dessous, les participants aveugles ne pouvaient pas traverser le passage demandé sans heurter les obstacles avec la canne blanche.

	Non-voyants (TP3)	Non-voyant (cane blanche)	Voyants (Vue)

Score moyen du test	18.83	0.17	18.67
Ecart Type	1.58	0.57	4.03

Tableau 4.5 : Résultats des participants voyants à la vue et non-voyants à la canne électronique et la canne blanche, selon le score du test.

Que ce soit pour les non-voyants au TP3 ou les voyants, globalement le bon passage a été pris sans collisions, les erreurs viennent essentiellement de confusion droite gauche par étourderie, qui ont été autant présentes chez les voyants que chez les non-voyants. La conclusion est donc que les non-voyants ont pu identifier à distance les trois types d'obstacles avec le TP3 et prendre le passage avec un taux de collision suffisamment faible pour être significatif, tout en commettant un taux d'erreurs droite gauche comparable aux voyants (toutes les erreurs de trajet ont été le bon obstacle pris du mauvais côté). Pour les non-voyants à la canne blanche le mauvais score est principalement dû aux collisions nécessaires pour connaître la largeur des obstacles en les touchant avec la canne et non à un taux d'erreurs dans le choix du passage. Le score de 0,17 provient du fait que tous les non-voyants ont touché pour trouver le bon passage et ont donc eu zéro, sauf un qui est passé par hasard au centre du bon passage sur un des 10 essais sans explorer et a eu deux points (d'où l'écart type supérieur à la moyenne).

La performance du temps

Pour les trois modalités : Tom Pouce III, Canne blanche et à la vue, réalisées par des sujets non-voyants et des sujets voyants, nous avons divisé le temps total en trois intervalles pour comparer plus précisément le temps des trois modalités. Le temps inclus dans nos statistiques à propos des trois modalités n'était que pour les tentatives réussies à prendre le passage requis.

Nous avons défini l'échelle comme suit :

- Le « Temps » est le temps total mis pour réaliser l'expérience (du temps de départ jusqu'à la traversée du passage), divisé en :
 1. Le temps nécessaire pour analyser les obstacles à distance.
 2. Le temps de la trajectoire : de l'heure de départ jusqu'au passage.
 3. Le temps des collisions faites pour trouver et franchir le passage.

Nous avons comparé les trois temps ci-dessus en utilisant le test t de Student. On a obtenu les résultats suivants ; comme on le voit clairement sur la figure 4.21. Il n'y a pas de différence significative pour le temps total parcouru pour accomplir le test pour les deux modalités : Canne blanche et Tom Pouce III, ($t(11) = 1.52, p = 0.154$). Mais une nette différence pour le temps total entre la canne électronique TP3 et la vue ($t(22) = 8.28, p < 0.05$). Cependant, lorsque nous regardons la même figure, nous pouvons voir des différences de répartition des temps entre les trois modalités. Il y a une nette différence significative pour le « temps de départ » et le « temps de collision », qui est corrélée à la manière différente d'utiliser les deux outils. Comme pour le « temps de départ » ($t(11) = 6.505, p = 0,0000439$), les participants non-voyants avec la canne électronique ont mis plus de temps au point de départ compte tenu du temps nécessaire pour analyser l'environnement à distance. Cette analyse de l'environnement étant impossible à la canne blanche, les sujets ont immédiatement démarré à la canne blanche en partant dans l'axe

de leur position initiale jusqu'à entrer en contact avec un obstacle. Après cela, les sujets non-voyants avec Tom Pouce III ont également pris plus de temps pour le « temps de trajectoire » par rapport à la canne blanche ($t(11) = 3.985, p = 0,00213$), nous concluons une différence significative. En effet en moyenne les participants non-voyants munis de la canne électronique continuent à rechercher le passage demandé en l'analysant à distance, pour le franchir en se centrant dans le passage sans contact. Quand les participants non-voyants avec une canne blanche sont arrivés en contact avec les obstacles, on constate également une nette différence significative pour le « temps de collision » (ou de franchissement de l'obstacle en analysant les différents passages par contact avec la canne blanche) : ($t(11) = 10.28, p = 0.000000558$), ceci s'explique par le temps nécessaire pour explorer l'environnement avec la canne blanche tout en étant au contact des obstacles. On n'en a pas besoin avec le Tom Pouce III. Par conséquent, un test t de Student pour des groupes indépendants a montré que les participants non-voyants utilisant le TP3 n'avaient aucune différence par rapport aux sujets voyants pour le temps de collision ($t(22) = 2.76, p = 0.011$).

Pour conclure, nous ne voyons pas de différences significatives pour le "temps total" entre la canne blanche et TP3 pour effectuer la tâche. Mais la distribution du temps pour réaliser le test est complètement différente en raison de la capacité de chaque outil : analyser l'environnement à distance ou par contact. Concernant le temps de franchissement au niveau du passage avec le TP3 il n'y a pas de différence significative avec la vue.

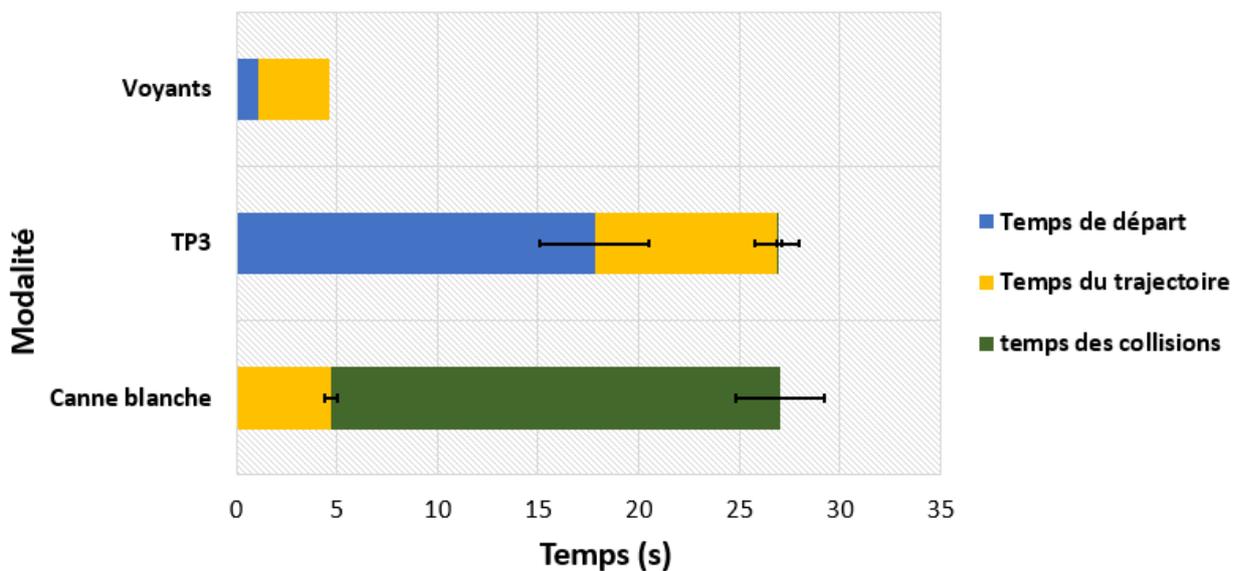


Figure 4.21 : Temps total subdivisé en : temps de départ, de trajectoire et de collisions pour la vue, le Tom Pouce III et la canne blanche, pour les passages corrects empruntés par les participants.

En conclusion, les résultats ne valident pas nos hypothèses initiales. En effet l'identification du passage que ce soit à la canne électronique, à la canne simple ou la vue n'est pas significativement différente. La cause principale d'erreurs est la confusion droite gauche indépendante de la modalité. Maintenant on remarque dans cette expérience que le TP3 partage à la fois les propriétés de la vue et de la canne simple. Il permet d'identifier le passage sans contact comme la vue, il met le même temps que la canne simple au final à effectuer l'opération.

IV.2. Perception de la passabilité au service de la locomotion

IV.2.1. Perception de la passabilité d'une ouverture

Dans cette étude, on s'est basé sur les travaux menés par Warren (Warren Jr., 1987) sur la passabilité d'une ouverture de porte. On a reproduit un protocole voisin avec des personnes voyantes à la vue et des personnes non-voyantes sous bandeau.

Les hypothèses sont les suivantes : la canne électronique permet une identification fiable de la passabilité d'une ouverture à distance. L'identification de la passabilité à la canne électronique est comparable à celle à la vue.

2.1.1. Participants

On a inclus les mêmes personnes non-voyantes que dans les protocoles précédents, comme expliqué dans la section (IV.1.2.1.) plus haut. Le protocole a été accepté par le comité d'éthique du Polethis de l'Université Paris-Saclay sous la référence CER-Paris-Saclay-2021-100.

2.1.2. Matériel et Méthode

Dans cette expérience nous avons réalisé deux murs de 1,5m de large matérialisés par des porte-manteaux équipés de blouses de laboratoire, les deux murs sont alignés et séparés par une ouverture de largeur variant entre zéro et 120 cm, avec un pas de 15cm comme on le voit sur la figure 4.22 ci-dessous. La figure 4.23 illustre différentes phases d'un essai du protocole.

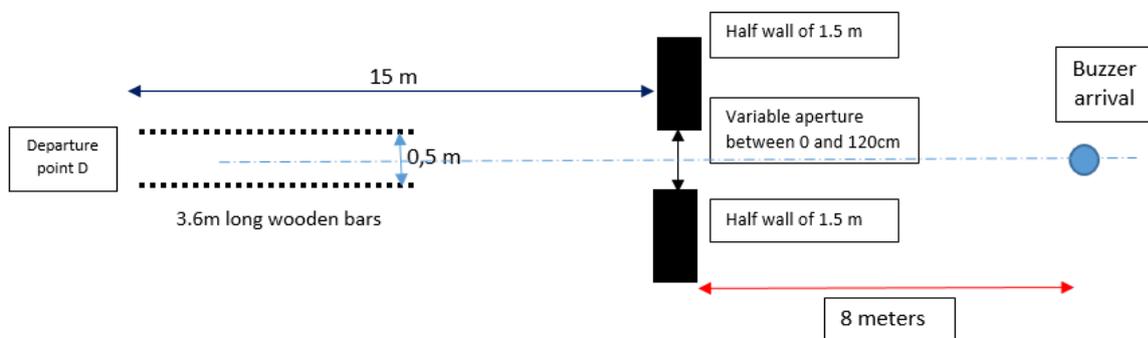


Figure 4.22 : schéma explicatif de l'aménagement de l'expérience.



Figure 4.23 : images réelles du déroulement de l'expérience.

Nous avons 11 sujets aveugles et 12 sujets voyants. Chaque participant devait démarrer du point de départ D comme dans la figure 4.22 ci-dessus. Pour définir un axe de départ en ligne droite visant le centre de l'ouverture, des barres en bois de 3,6 m de long des deux côtés ont été posées au sol et espacées de 50 cm. Le sujet devait franchir l'ouverture ou la contourner selon la largeur de l'ouverture par rapport à la largeur de ses épaules pour finaliser son parcours en appuyant sur le « Buzzer » situé au sommet d'un porte manteau. Dans notre étude, nous avons comparé les trois modalités suivantes :

- a) Les sujets non-voyants sous bandeaux avec la canne électronique TP3.
- b) Les sujets non-voyants sous bandeaux avec la canne blanche.
- c) Les personnes voyantes avec leur vue.

Nous avons mis en place deux procédures :

- 1) Dans le premier processus dit "sans feedback", le participant devait s'arrêter dès qu'il avait pris la décision de franchir ou de contourner l'ouverture. Il dit oralement s'il pense traverser l'ouverture ou la contourner. Puis il retourne au point de départ. C'est un processus sans rétroaction car l'action de franchissement ou de contournement n'est pas réalisée, il ne peut savoir si sa décision est juste.
- 2) Dans le deuxième processus dit "avec feedback", le participant devait soit traverser l'ouverture, soit la contourner sans interrompre sa marche. S'il a contourné, il ne dit rien car nous pouvons voir l'écart de trajectoire associé dans la vidéo. Mais s'il a décidé de la traverser, il le dit oralement "je traverse" au moment où il a pris la décision.

La disposition mécanique de l'expérience ne change pas dans les deux processus, le seul paramètre variable est la largeur de l'ouverture par pas de 15cm.

Nous avons procédé comme suit pour chaque modalité, processus et sujets :

1. Trois modalités pour les sujets non-voyants sous-bandeaux :
 - Sans Feedback avec la canne électronique TP3.
 - Avec Feedback avec la canne électronique TP3.
 - Avec Feedback avec la canne blanche.
2. Deux modalités pour les sujets voyants :

- Sans Feedback avec leur vue.
- Avec Feedback avec leur vue.

Il y a eu 18 essais dans chaque modalité. Les sujets non-voyants ont eu 54 essais au total pour les trois modalités et les sujets voyants ont eu 36 essais pour les deux modalités. Le sol entre le point de départ et le passage était un linoléum quadrillé qui permettait d'avoir des repères de distance pour l'analyse de la trajectoire. Un enregistrement vidéo a été réalisé sur le côté, en suivant le sujet. Pour chaque essai, nous avons mesuré le temps mis à parcourir le trajet, la largeur d'ouverture, la distance à laquelle la décision est prise : soit traverser, soit contourner. La largeur des épaules de chaque participant était mesurée à la fin de l'expérience.

2.1.3. Résultats et Discussion

Pour déterminer la largeur d'ouverture critique (Critical Aperture Width, en anglais) nous avons utilisé une fonction logistique pour ajuster la proportion de réponses "OUI : je peux traverser l'ouverture" en fonction de la largeur d'ouverture, afin de calculer à la fois le point d'égalité subjective (PSE) et la différence juste perceptible (JND) de la largeur d'ouverture critique.

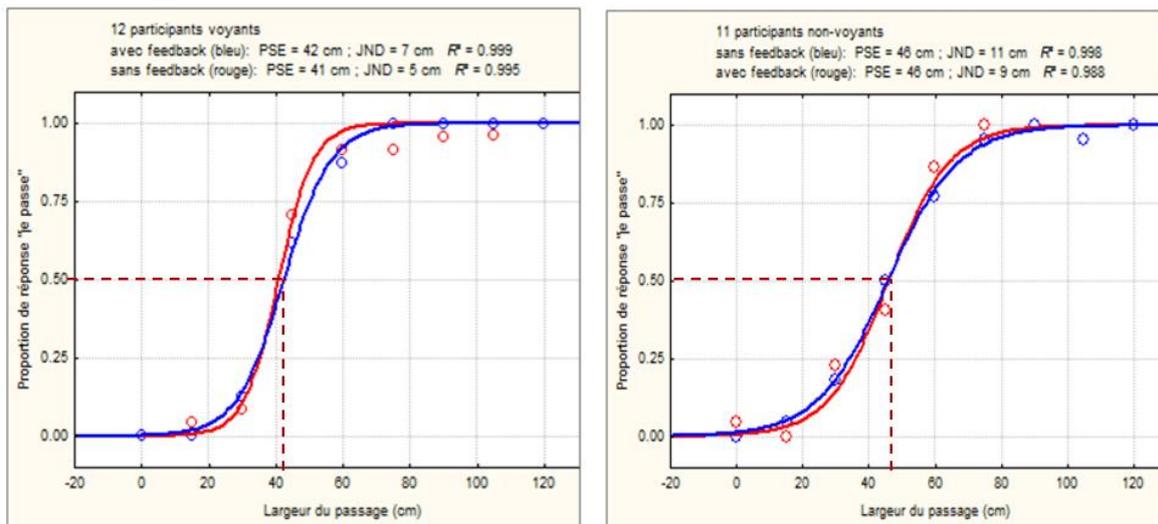


Figure 4.24.1 : Proportion des réponses "OUI : je peux traverser l'ouverture" en fonction de la largeur d'ouverture, pour chaque condition de feedback, chez les 12 voyants (à gauche) et les 11 non-voyants avec le TP3 (à droite).

La Figure 4.24.2 explique la signification des valeurs de PSE et JND. Le PSE est le point d'égalisation subjective (Point of Subjective Equality, en anglais) qui correspond à la largeur du passage pour laquelle on répond que l'on passe avec une probabilité de 0,5. Il s'agit du seuil perceptif de la passabilité qui correspond dans cet exemple à une largeur de passage de 50cm. Quant à lui, le JND (Just Noticeable Difference, en anglais) estime la différence tout juste perceptible entre deux largeurs de passage. Le JND est la valeur de changement d'intensité du stimulus qui fait passer d'une probabilité de 0.5 à 0.75 dans les réponses, et correspond à six cm environ dans cet exemple.

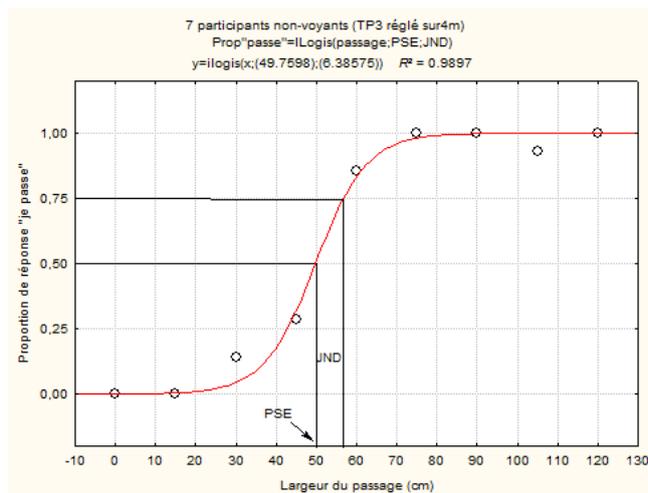


Figure 4.24.2: Exemple explicitant la signification des JND et le PSE

Tout d'abord, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les valeurs de PSE et JND, en comparant les performances des participants aveugles avec le TP3 et voyants. Le feedback (avec ou sans) a été traité comme un facteur intra-sujet, et le groupe (participants voyants ou aveugles) comme un facteur inter-sujet. L'ANOVA sur les valeurs de PSE a montré que la réponse moyenne était similaire pour les participants voyants ($M = 44.3$ cm) et aveugles ($M = 45.1$ cm), $F(1, 21) = 0.027$, $p = 0.871$. De même, les valeurs moyennes de PSE étaient équivalentes avec ($M = 44,9$ cm) et sans feedback ($M = 44.5$ cm), $F(1, 21) = 0.033$, $p = 0.857$. De plus, **l'interaction Groupe x Feedback n'était pas significative**, $F(1, 21) = 0.138$, $p = 0.71$. Il est à noter que la moyenne des valeurs individuelles de PSE était équivalente à valeur moyenne de PSE par condition par groupe calculée à partir de la fonction logistique ajustée à la proportion moyenne de réponses OUI de tous les participants regroupés.

L'ANOVA sur les valeurs de JND a montré que la moyenne de JND était marginalement plus élevée pour les aveugles ($M = 3.75$ cm) que pour les voyants ($M = 1.10$ cm) et les participants, $F(1, 21) = 3.605$, $p = 0.071$. Cette différence reflète la pente plus faible de la fonction logistique pour les participants aveugles par rapport à la pente pour les participants voyants (voir Figure 4.24). Notez que contrairement aux valeurs PSE, la moyenne des valeurs JND individuelles était inférieure à la moyenne JND par condition par groupe calculée à partir de la fonction logistique ajustée à la proportion moyenne de réponses OUI de tous les participants regroupés. Cependant, les valeurs de JND ne différaient pas selon qu'elles étaient obtenues avec ($M = 2.97$ cm) ou sans feedback ($M = 1.88$ cm), $F(1, 21) = 0,875$, $p = 0.36$. **Enfin, l'interaction Groupe x Feedback n'était pas significative**, $F(1,21)=0.198$, $p = 0.66$.

Ensuite, nous avons effectué des tests t appariés afin d'étudier **les performances des participants aveugles utilisant soit la canne, soit le TP3 avec feedback**. Ces analyses ont montré que les valeurs PSE ne différaient pas significativement, $t(10) = 1.386$, $p = 0.196$, entre la canne ($M = 36.76$ cm) et le TP3 ($M = 44.87$ cm). De même, les valeurs JND **ne diffèrent pas significativement**, $t(10) = 1.117$, $p = 0.29$ entre la canne ($M = 7.98$ cm) et le TP3 ($M = 4.10$ cm).

Nous avons ensuite décidé d'effectuer **une analyse en tenant compte de la largeur des épaules des participants**. La largeur médiane des épaules était de 55 cm pour tous les participants, qu'ils soient aveugles ou voyants. Par conséquent, nous avons divisé tous les participants en deux groupes : ceux ayant une "petite" largeur d'épaule (< 55 cm, $n = 11$) et ceux ayant une "grande" largeur d'épaule (> 55 cm, $n = 11$), comme l'illustre la figure 4.25. Nous avons d'abord réalisé une ANOVA à mesures répétées sur les valeurs PSE et JND, en comparant les performances avec ou sans feedback pour les participants aveugles utilisant le TP3 et les participants voyants. Le retour d'information (avec ou sans) a été traité comme un facteur interne au sujet, tandis que la largeur des épaules (petite ou grande) et le groupe (participants voyants ou aveugles) ont été traités comme un facteur inter-sujet.

L'ANOVA sur les valeurs PSE pour la largeur d'ouverture critique n'a montré aucun effet des principaux facteurs expérimentaux, ni aucune interaction significative entre eux (tous les $ps > 0,39$). En revanche, bien que l'ANOVA sur les valeurs JND n'ait montré aucun effet des principaux facteurs expérimentaux (tous les $ps > 0,26$), à l'exception d'un effet marginal du groupe avec des valeurs JND plus élevées pour les participants aveugles ($M = 3.71$ cm) que pour les voyants ($M = 1.14$ cm), $F(1, 19) = 3.93$, $p = 0.062$. En outre, **les interactions entre les facteurs n'étaient pas significatives** (tous les $ps > 0,66$), sauf que la JND de chaque groupe de participants variait significativement en fonction de la taille de l'épaule, $F(1, 19) = 4.74$, $p = 0.042$. Les tests post-hoc de Tukey n'ont révélé que des valeurs de JND supérieures pour les individus de petite taille d'épaule par rapport à ceux de grande taille d'épaule, $p = 0.056$, parmi les participants aveugles. En fait, cette interaction regroupe l'effet du feedback sur les données, comme l'illustre la figure 4.26, correspondant à une interaction marginale entre les trois facteurs, $F(1, 19) = 3.57$, $p = 0.074$. D'un point de vue descriptif, l'interaction suggère que l'effet de la taille de l'épaule chez les participants aveugles est dû à la condition de rétroaction ; toutefois, la comparaison post-hoc correspondante n'a pas atteint le seuil de signification, $p = 0.127$.

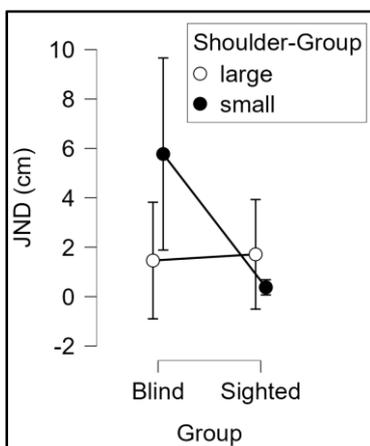


Figure 4.25 (ci-contre) : JND de la largeur d'ouverture critique pour chaque groupe de participants en fonction des tailles d'épaules.

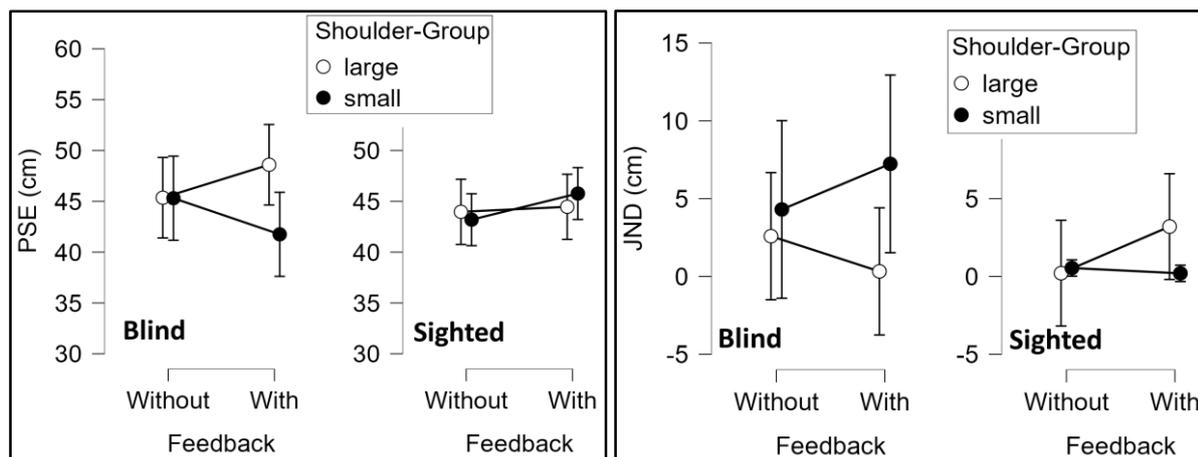


Figure 4.26 : PSE et JND de la largeur d'ouverture critique pour les participants aveugles utilisant le TP3 et pour les participants voyants, en fonction des épaules et du feedback (les barres d'erreurs représentent l'intervalle de confiance à 95% autour de la moyenne).

Concernant la distance de prise de décision avec feedback, la distance moyenne de prise de décision à la canne simple a été de 0,8 m au contact de l'ouverture avec la canne, avec un écart-type de cinq cm correspondant aux différences de longueur de canne en fonction de la taille de la personne. Avec le Tom Pouce III la distance moyenne d'anticipation a été de 3.14m avec un écart-type de 96 cm, à la vue la distance a été de 11.6 m avec un écart-type de 40 cm. Les trois plages de distances d'anticipation sont significativement différentes pour les trois modalités. On peut dire que ce qui différencie les trois modalités est la distance de prise de décision.

A la canne blanche tous les sujets ont touché les obstacles pour évaluer la largeur du passage et pour contourner le mur, sauf pour les passages les plus larges, où il est arrivé que des sujets en tenant leur ligne droite passent sans toucher, car le passage était dans l'axe du départ.

A la canne électronique il y a eu sept contournements en moyenne avec un écart type de un. Le mur a été frôlé avec contact des épaules 3,6 fois soit un taux de frôlement de 52% avec un écart type de 31%.

Pour le passage dans l'ouverture, à la canne électronique, il y a eu en moyenne 10,9 passages avec un écart type de 1,1, et 3,27 frôlements soit un taux de frôlement de 29,9% avec un écart type de 21,5%.

Ces deux taux de frôlement sont très élevés par rapport aux protocoles qui vont suivre, il faudra expliquer dans la discussion pourquoi il s'agit d'une action difficile avec la canne électronique.

En conclusion, les résultats valident nos hypothèses initiales c'est à dire que la canne électronique permet une identification fiable de la passabilité d'une ouverture à distance et l'identification de la passabilité à la canne électronique est comparable à celle à la vue. Selon les résultats obtenus ci-dessus il n'y a pas de différence significative observée entre les différents groupes des voyants et non-voyants pour le JND et le PSE. A la canne blanche, la passabilité ne s'effectue pas à distance, c'est au contact de l'ouverture que sa passabilité est explorée avec la canne, les PSE et JND ne présentent pas de différence significative avec les voyants ou les non-voyants au TP3. La

distance d'anticipation est environ quatre fois plus grande au TP3 par rapport à la canne, et celle de la vue encore environ quatre fois plus grande que celle du TP3.

D'après les réponses collectées du questionnaire rempli par les participants à la fin des études, sur le déroulement du protocole (cf. Annexe 4), les voyants se sont plaints des 36 essais du protocole et les non-voyants des 54 essais. A posteriori, on pourrait probablement se passer de la partie sans feedback, car sur le nombre d'essais, avec une ouverture qui change tout le temps, il est peu probable qu'il y ait en cours de protocole un processus d'apprentissage. Sachant de plus que pour la moitié environ des essais il y aura un contournement qui ne permettra pas de connaître la taille réelle de l'ouverture, y compris quand cette dernière est traversée sans contacts, le non voyant ne pouvant avoir un feedback sur l'ouverture réelle. Sinon l'exercice représente bien selon les sujets une situation réelle à laquelle ils sont confrontés tous les jours. Malgré la durée ils ont trouvé l'exercice intéressant et déclaré amusant d'aller chercher le buzzer de fin de parcours avec le TP3 (alors que c'était fastidieux à la canne blanche).

IV.2.2. Navigation simple au milieu de nombreux obstacles

Nous avons fait des expériences préliminaires pour mettre au point ce protocole dont une a été présentée en congrès (Dernayka et al; 2019). On s'est inspiré d'une situation réelle rencontrée souvent dans la vie quotidienne des personnes non-voyantes : marche sur un trottoir encombré contenant des obstacles mobiles ou immobiles (piétons, poubelles etc.). Pour cela, nous avons reconstitué sur une distance de 25 mètres une configuration plausible de trottoir réel : un mur sur l'un des côtés, une largeur de 2,4 mètres dans lequel sont placés des obstacles dont les tailles sont similaires aux humains ou aux poubelles.

L'hypothèse est la suivante : la canne électronique permet de bien détecter les obstacles afin de permettre une meilleure régulation de la trajectoire .

Cette hypothèse étant faite pour des sujets expérimentés à l'outil.

2.2.1. Participants

On a inclus les mêmes personnes non-voyantes que dans les autres protocoles. Le protocole a été accepté par le comité d'éthique du Polethis de l'Université Paris-Saclay sous la référence CER-Paris-Saclay-2019-038.

2.2.2. Matériel et Méthode

Dans ce protocole il s'agit de déambuler sur un couloir de 25 mètres de long et 2,4 mètres de large, ayant un mur sur le côté. Pour éviter d'avoir à construire une structure surélevée ou de trouver un trottoir réel dont on puisse garantir l'absence de passage incontrôlé, nous avons choisi un hangar de 25 mètres de long et délimité le trottoir par des barres en bois au sol formant une ligne droite, (cf. figure 4.27 ci-dessous). Afin de simuler un encombrement nous avons placé des

obstacles constitués de portes manteaux avec des blouses (1.2 m de hauteur et 60 cm de large), pour simuler les personnes sur le trottoir ou les poubelles.

On a réalisé le protocole selon deux modalités avec 12 personnes non-voyantes uniquement sous bandeau, en débutant aléatoirement le test par l'une des deux modalités suivantes :

1. La canne blanche.
2. La canne blanche électronique TP3.

La personne doit traverser le couloir sans collisions ni frôlement avec les obstacles en ayant un temps limite de 45 secondes par traversée. Le sujet a le droit à quatre erreurs, à la cinquième erreur le test s'arrête. Une erreur consiste à :

- Entrer en contact avec l'obstacle, même s'il s'agit d'un frôlement très léger.
- Toucher le mur avec la canne ou le corps.
- Dépasser le temps limite (45 sec).
- On a le droit de toucher trois fois la bordure en bois sur une traversée avec la canne, un quatrième toucher de canne de la bordure en bois est considéré comme une erreur. En effet un non-voyant doit pouvoir se centrer sur un trottoir et ne doit pas longer le dénivelé du trottoir pour avancer ce qui est une pratique dangereuse. Trois touchers de canne sont normalement suffisants pour se représenter la bordure du trottoir.

Pour le premier trajet il n'y a qu'un obstacle, s'il n'y a pas eu d'erreur de commise, le niveau un est acquis et le trajet suivant contient deux obstacles. Si une erreur est commise avec deux obstacles, la personne reste au niveau un et un nouvel essai avec deux obstacles est réalisé. Si cet essai est fructueux, la personne valide le niveau deux. La position des obstacles change à chaque essai. On continue ainsi jusqu'à huit obstacles. Les obstacles sont toujours disposés de façon à ce qu'il y ait un passage possible d'au moins un mètre de large. Les obstacles ou rangées d'obstacles sont séparées d'au moins quatre mètres, afin qu'il n'y ait pas une concentration d'obstacles qui pourraient correspondre à une seule procédure d'évitement. A partir de quatre obstacles il y aura à chaque fois quatre opérations d'évitement à faire constituer d'un ou deux obstacles alignés sur le passage. La figure 4.27 est un exemple de configuration à 8 obstacles.

Pour les personnes arrivées au niveau huit et n'ayant pas commis quatre erreurs, on prend en considération son temps réalisé au niveau huit, on le réduit de cinq secondes s'il est plus grand que 25 secondes, on le réduit de trois secondes s'il est inférieur à 22 secondes et de deux secondes s'il est inférieur à 19 secondes, et cela constitue une nouvelle limite de temps. On réduit ainsi le temps limite jusqu'à ce que la personne effectue la cinquième erreur soit par contact avec un obstacle ou le mur, soit par un temps supérieur au temps limite.



Figure 4.27 (ci-contre) : on voit un participant descendre un chemin de 25 m de long et 2,4 m de large ; des barres en bois de sept cm de large pesant 4.5 kg étaient positionnées sur le côté droit du chemin, et un mur était sur le côté gauche. Des obstacles constitués de blouses de laboratoire sur des portes manteaux ont été placés le long du chemin.

Avant le démarrage du test le sujet a le droit de faire un aller de 25 m sans obstacles et un retour avec deux obstacles. Toutes les traversées sont filmées par deux caméras, une suivant le sujet et l'autre filmant une vue d'ensemble. Nous collectons les informations suivantes : score final compris entre zéro et huit et durée de chaque traversée donnant la vitesse moyenne.

Concernant le groupe des voyants, nous avons simplifié le protocole car les premières étapes étaient trop faciles pour présenter le moindre intérêt, et les dernières trop dangereuses, car en demandant la vitesse maximale nous avons eu des chutes avec les personnes ayant participé à la mise au point du test. Nous avons donc démarré au niveau huit, imposé de garder la marche (interdiction de courir) et donné cinq essais pour chercher à faire le meilleur temps. Nous avons pris la moyenne des cinq essais.

2.2.3. Résultats et Discussion

D'après les résultats du questionnaire rempli par les participants à la fin des études, sur le déroulement du protocole (cf. Annexe 5), plus de 90% des sujets non-voyants ont apprécié ce protocole, ils l'ont trouvé amusant, motivant et ludique avec sa présentation sous forme de challenge. L'exercice était jugé de difficulté moyenne, et l'ont trouvé familier vu qu'ils sont confrontés à des situations similaires très souvent : le déplacement sur les trottoirs des villes qui sont souvent très encombrés d'objets divers, la déambulation dans les couloirs du métro ou sur les quais de gare, les gens qu'on veut éviter de toucher au passage...

Il est possible qu'un participant puisse traverser une ouverture sans toucher d'obstacles par hasard. En effet, lorsqu'il n'y a qu'un ou deux obstacles (60 cm de large) dans un chemin de 2,4 m de large, il y a de fortes chances que quelqu'un puisse le parcourir sans toucher un obstacle, uniquement par hasard. Nous avons donc évalué la probabilité d'atteindre un score donné via une trajectoire aléatoire (cf. tableau 4.6). Pour calculer la probabilité associée à une trajectoire aléatoire, nous avons estimé la probabilité de franchir les obstacles par hasard, en considérant la largeur du chemin, la largeur de la personne (typiquement 50 cm) et les largeurs et positions des obstacles. La longueur de l'espace libre disponible pour parcourir le chemin sans contact divisée par l'étendue des positions possibles de la personne sur le chemin donne la probabilité de franchir un obstacle par hasard. Par exemple, la probabilité de franchir un obstacle au milieu du chemin par hasard est inférieure à celle du même obstacle sur le côté du chemin. Lorsque l'obstacle est

plus grand, la chance est plus faible. Plus le nombre d'obstacles est grand, plus les chances sont faibles. Nous illustrons sur la figure 4.28 les paramètres sur lesquels le calcul a été basé. Le chemin faisait 2,4 m de large, et nous avons considéré un obstacle de 60 cm de large au centre du chemin. Les ouvertures gauche et droite avaient une largeur de 90 cm. La personne mesurait 50 cm de large, donc la possibilité d'entrer par hasard dans le chemin de gauche sans collision était de $(90-50)/(240-50)$, soit 0,21. Pour les deux ouvertures, la probabilité était alors de 0,42. Nous avons dû prendre en compte la position et la largeur de chaque obstacle, et les différentes combinaisons, afin de calculer la probabilité de chaque score (Cf. figure 4.28).

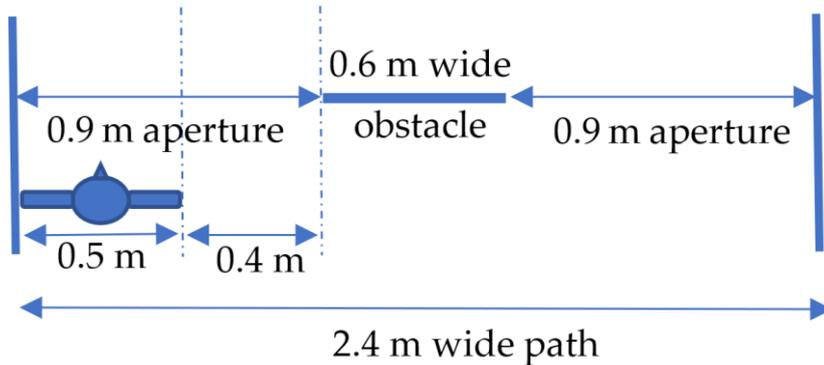


Figure 4.28 : Un schéma du vue de dessus du montage expérimental qui illustre les paramètres utilisés pour calculer la probabilité de franchir les ouvertures sans collisions par hasard.

Score	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Probability of getting the score at random	0.02	0.23	0.43	0.26	6.1×10^{-2}	7.2×10^{-3}	4.3×10^{-4}	1.5×10^{-5}	1.8×10^{-7}

Tableau 4.6 : Probabilité d'un score donné avec une trajectoire aléatoire.

Le calcul complet des probabilités est explicité dans l'annexe de l'article (Dernayka et al; 2021). Les scores moyens des participants aveugles au test de mobilité sont représentés sur la figure 4.29. Pour une simple canne blanche, le score moyen était de 1.6 (écart type de 0.67), alors qu'avec le Tom Pouce III, le score moyen était de 6.4 (écart type de 1,56).

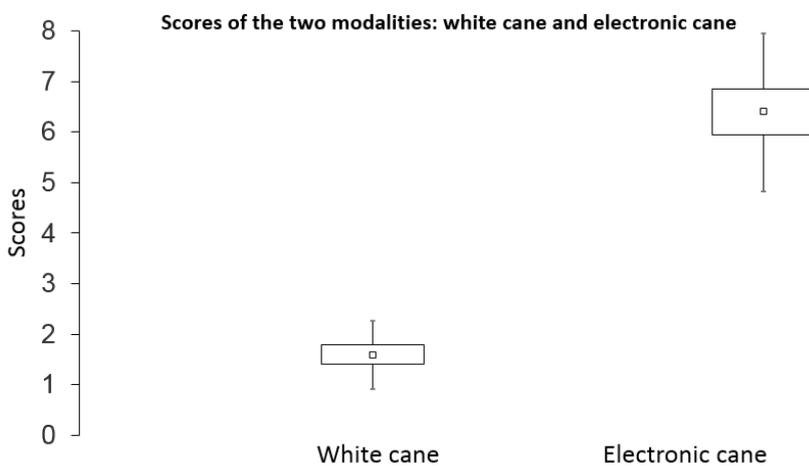


Figure 4.29 (ci-contre) : Effet de l'utilisation de la canne blanche simple et du Tom Pouce III pour le score de mobilité (\pm SD = barre d'erreur ; \pm SE = rectangle).

Le score le plus probable ($p = 0.43$) obtenu avec une trajectoire aléatoire était « 2 » (cf. tableau 4.6) avec un score moyen donné au hasard de 2.1 (à partir des produits des scores et des probabilités). Les résultats montrent que le score d'évitement d'obstacles lors de l'utilisation de la canne blanche ($M = 1.6$) ne diffère pas du hasard ($0.227 < p < 0.429$), alors que le score d'évitement d'obstacles lors de l'utilisation du Tom Pouce III ($M = 6.5$, $p = 0.000027$) était très supérieur au hasard.

Les tests t appariés de Student pour comparer les performances moyennes entre la canne blanche et le Tom Pouce III (Figure 4.29) ont indiqué des scores significativement plus élevés lors de l'utilisation du Tom Pouce III, $t(11) = 10.12$, $p = 0.00000066$. La vitesse moyenne de marche des participants en m/s est rapportée à la Figure 4.30. La vitesse moyenne des 12 participants était de 0.9 m/s lors de l'utilisation de la canne simple, et les vitesses lors de l'utilisation de la canne électronique (avec, respectivement, SD = 0.22 et 0.2) étaient très similaires dans les deux modalités. Il n'y avait pas de différence significative dans la vitesse moyenne de marche en fonction de la canne, $t(11) = 1.32$, $p = 0.21$, suggérant que la différence de score ne peut pas être attribuée à une différence de vitesse de marche. En d'autres termes, il n'y avait pas de compromis vitesse-précision dans nos données.

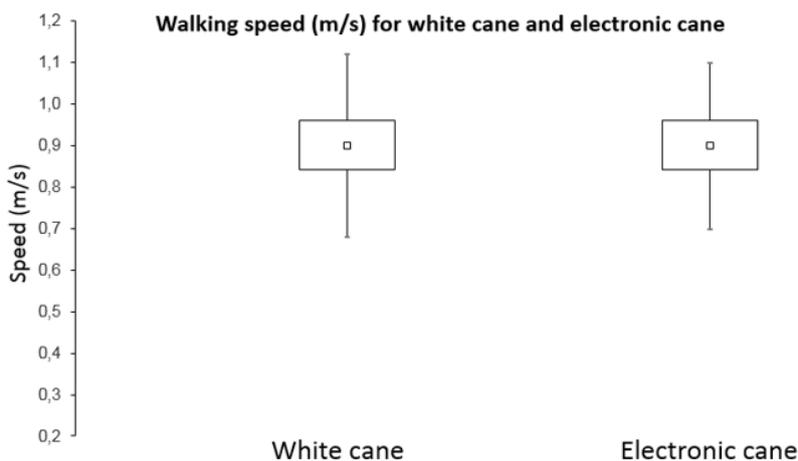


Figure 4.30 (ci-contre) : résultats de la vitesse moyenne de marche pour la canne blanche simple et du Tom Pouce III.

Les participants quatre, cinq, sept, neuf et 12 ont réussi à parcourir le chemin avec huit obstacles sans contact avant de commettre la cinquième erreur éliminatoire. Ils ont été invités à naviguer le plus rapidement possible jusqu'à atteindre le cinquième contact ou ne pas franchir la limite de temps. Ainsi, les plus grandes vitesses atteintes pour l'épreuve avec huit obstacles sans contact étaient de 0,7 m/s pour le participant quatre, 1,4 m/s pour le participant cinq (le participant cinq a atteint le score de huit sans faire un seul contact au cours du processus), 1,5 m/s pour le participant 7, 1,4 m/s pour le participant neuf et 1,55m/s pour le participant 12.

Concernant la vitesse, dans la modalité de canne blanche simple, la plupart des sujets se sont arrêtés au niveau deux, un seul ayant obtenu le niveau trois. Ils n'ont pas eu à déambuler dans un espace très encombré où ils auraient été arrêtés par de nombreuses collisions. On peut s'attendre à ce qu'ils aient été plus lents avec huit obstacles, mais cela ne reste qu'une hypothèse car nous ne l'avons pas vérifié, ce qui pourra être fait dans une expérience complémentaire.

Concernant la comparaison avec les voyants, les voyants n'ont pas fait de collisions et ont atteint des vitesses supérieures à celle des non-voyants (2,3m/s, soit 8,2km/h) contre 0,9m/s. A titre anecdotique nous avons fait refaire le test dans les mêmes conditions que les voyants aux non-voyants ayant eu des bons scores au TP3, un seul sujet non-voyant a réussi à rejoindre les performances des voyants avec une traversée sans collisions à la vitesse de 2,65m/s soit 9,6km/h. C'était le sujet aux trajectoires les plus fluides et le seul à utiliser en permanence la portée de six mètres dans ce protocole les autres sujets utilisant la portée de quatre mètres. Cela relève plus d'une performance sportive que d'une faculté reproductible chez d'autres sujets.

Nous avons effectué un second dépouillement de l'expérience selon la règle suivante, nous avons compté le nombre d'obstacles n franchis à la canne simple pour chaque sujet jusqu'à la cinquième erreur. Parmi ces n obstacles franchis, il y avait p collisions. Nous avons alors défini la probabilité p/n de franchir un obstacle sans collision à la canne simple. Pour le même sujet à la canne électronique nous avons observé ses n premiers franchissements et relevé les p' collisions, nous avons calculé la probabilité p'/n de franchir un obstacle sans collisions à la canne électronique. Pour l'ensemble des sujets le nombre n moyen a été de 11,6 avec un écart type de 3,5. La probabilité de collision à la canne simple a été de 53% avec un écart type de 14%. La probabilité de collision à la canne électronique a été de 9,2% avec un écart type de 9%.

Conclusion :

Nos résultats valident notre hypothèse : la canne électronique permet de mieux éviter les obstacles par rapport à la canne blanche afin de permettre une meilleure régulation de la trajectoire.

Si la trajectoire des voyants est comparable à celles qui sont fluides chez les non-voyants au TP3, la fiabilité en termes d'absence de collisions est largement meilleure chez les voyants qui peuvent atteindre des vitesses plus élevées.

IV.2.3. Navigation répétée au milieu de nombreux obstacles

Dans ce protocole, nous reprenons la structure expérimentale du protocole "navigation simple au milieu de nombreux obstacles" : simulation de trottoir encombré de 25 mètres de long et 2,4m de large. Par contre, il s'agira de faire des aller-retours pendant 20 minutes consécutives avec trois obstacles sur le passage.

L'hypothèse : La canne électronique engendre une perte de performance dans la durée due à la fatigue mentale des utilisateurs.

2.3.1. Participants

On a inclus les mêmes personnes non-voyantes que dans les autres protocoles Le protocole a été accepté par le comité d'éthique du Polethis de l'Université Paris-Saclay sous la référence CER-Paris-Saclay-2019-038. Un participant ne s'est pas présenté, il n'y a eu que 11 participants.

2.3.2. Matériel et Méthode

La conception de ce protocole nous a pris du temps parce que ce n'était pas facile de définir un protocole qui permette de mesurer la fatigabilité mentale de l'utilisateur par l'outil de substitution sensorielle. On a testé de nombreuses variantes pour finalement converger sur une longue durée de marche avec un nombre modéré d'obstacle (cf. figure 4.31), chose plus représentative de la vie réelle que le protocole précédent qui a plus une coloration d'épreuve « type sprint » demandant un effort sur une courte durée.



Figure 4.31 : Exemple de trajet du protocole de navigation répétée.

La méthode est la suivante :

Il y a trois obstacles sur le trajet : un de 60 cm de large et deux mis ensemble pour faire un obstacle de 1,2 m de large. Deux investigateurs interviennent, le premier suit le sujet en filmant, le second situé 10 mètres derrière afin de changer la position des obstacles pour qu'elle soit différente à chaque traversée.

Les instructions données aux participants avant le début de l'expérience sont :

- Faire des allers-retours dans le couloir pendant vingt minutes sans arrêt.
- Les obstacles sont changés après chaque passage.
- Il n'y a pas de limites de contacts ou collisions provoquant l'arrêt anticipé de l'épreuve.
- L'expérience sera arrêtée par l'investigateur à la fin de la vingtième minute.

On a réalisé le protocole uniquement avec des sujets non-voyants sous bandeaux avec la canne électronique Tom Pouce III.

Les données extraites des vidéos sont les suivantes : Nombre de traversées réalisées pendant les 20 minutes, inventaires des frôlements et collisions avec leur instant d'occurrence.

2.3.3. Résultats et Discussion

D'après les réponses collectées du questionnaire rempli par les participants à la fin des études, sur le déroulement du protocole (cf. Annexe 6), les sujets ont jugé le protocole très intéressant, amusant et ludique. En précisant que " lorsqu'on se déplace régulièrement pour de longs trajets, on est confronté à cette nécessité d'endurance".

Nous avons analysé l'éventuelle variation du comportement locomoteur au cours de la tâche, en subdivisant les 20 minutes de marche en quatre fenêtres temporelles de cinq minutes chacune, et en traitant cette source de variance en facteur intra-sujet. Une première ANOVA n'a pas montré d'effet significatif de la Fenêtre temporelle sur la vitesse de marche (m/s) moyenne, $F(3, 30) = 1.295$, $p = 0.29$, comme l'illustre la Figure 4.32 ci-dessous; suggérant une stabilité de la vitesse de marche au cours des fenêtres temporelles.

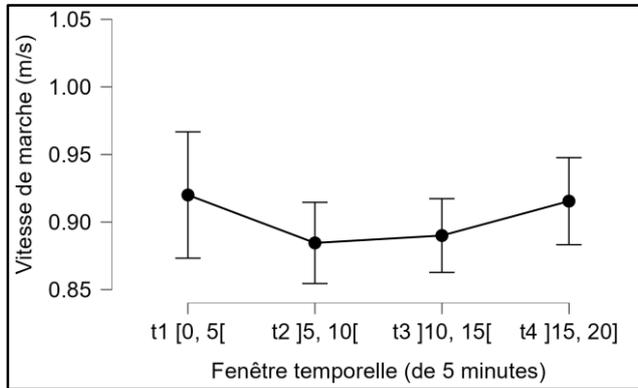


Figure 4.32 (ci-contre) : Vitesse moyenne de marche (m/s) en fonction de chaque fenêtre temporelle (les barres d'erreur sont des intervalles de confiance à 95%).

Une seconde ANOVA n'a pas montré d'effet significatif de la Fenêtre temporelle sur le nombre de trajets sans contact, $F(3, 30) = 0.53$, $p = 0.67$, comme l'illustre la Figure 4.33 suggérant une stabilité du contrôle locomoteur au cours des fenêtres temporelles.

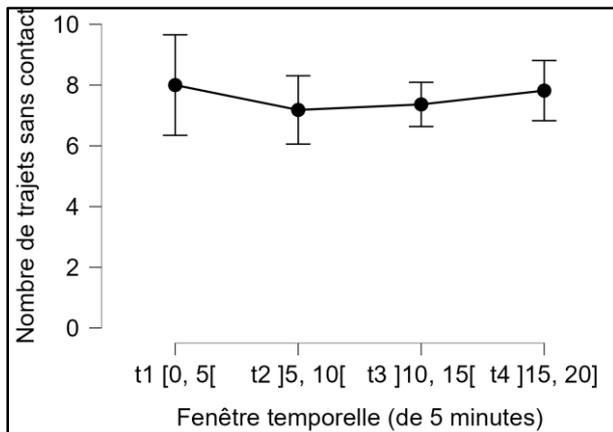


Figure 4.33 (ci-contre) : Nombre moyen de trajets sans contact pour chaque fenêtre temporelle (les barres d'erreur sont des intervalles de confiance à 95%)

Enfin, une dernière ANOVA n'a pas montré d'effet significatif de la Fenêtre temporelle sur le nombre de trajets avec contact, $F(3, 30) = 0.40$, $p = 0.75$, comme l'illustre la Figure 4.34 suggérant à nouveau une stabilité du contrôle locomoteur au cours des fenêtres temporelles.

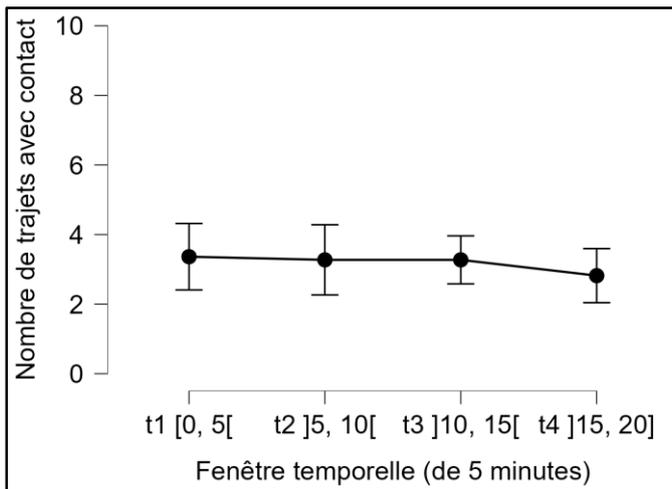


Figure 4.34 (ci-contre) : Nombre moyen de trajets avec contact pour chaque fenêtre temporelle (les barres d'erreur sont des intervalles de confiance à 95%)

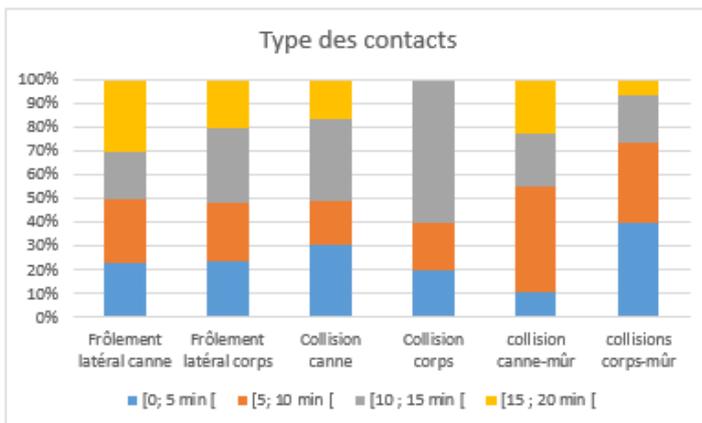


Figure 4.35 (ci-contre) : Graphe montrant les différents types de contacts sur les quatre fenêtres temporelles de cinq minutes chacune.

Une analyse descriptive de la répartition des types de contacts en fonction des fenêtres temporelles (cf. Figure 4.35) indique que les collisions corporelles qui sont des erreurs fortes arrivent essentiellement entre 10 et 15 min qui correspondent à la période de moins bonnes performances. Si on observe un trajet d'un sujet en détail, le sujet neuf ici en traçant la vitesse moyenne au cours du temps ainsi que la position temporelle des frôlements et contacts, on observe que les contacts n'arrivent pas dans les phases où la vitesse est la plus élevée (cf. figure 4.36).

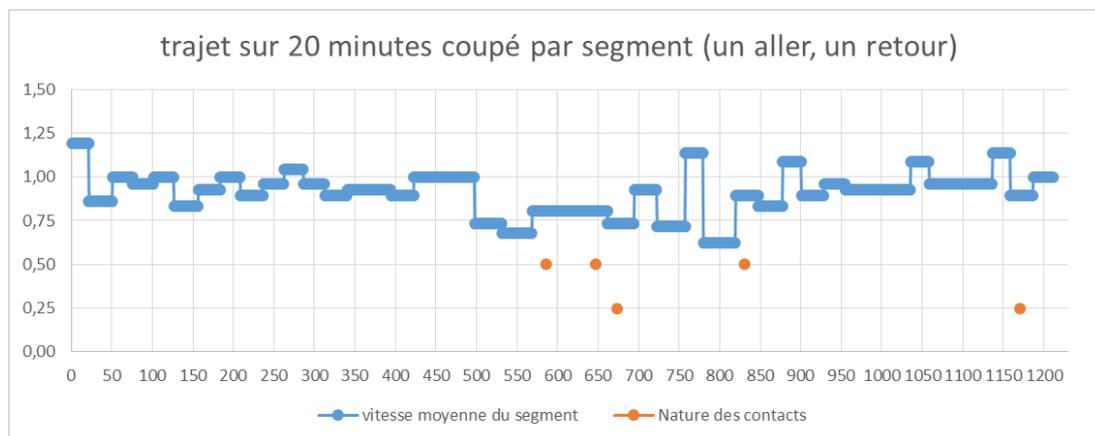


Figure 4.36 : Tracé de la vitesse moyenne (en Y) au cours du temps ainsi que la position temporelle des frôlements et contacts, pour le sujet neuf.

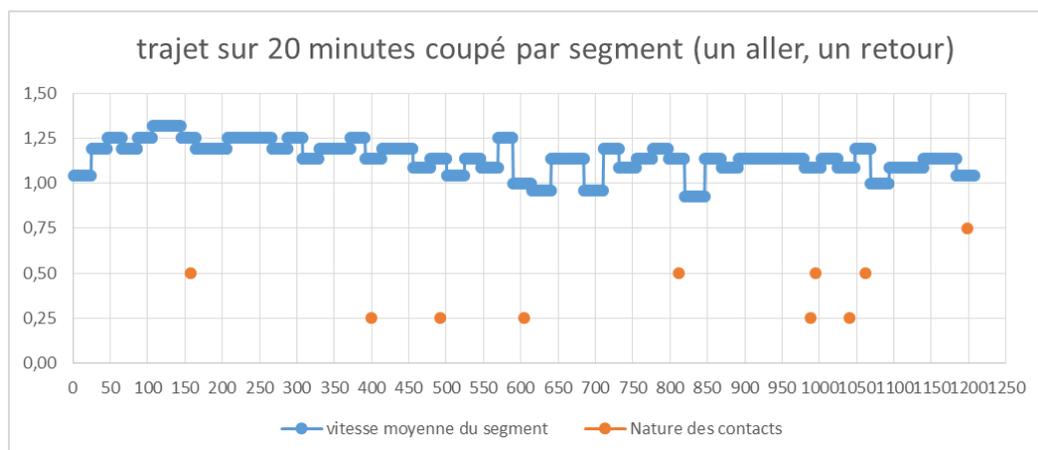


Figure 4.37 : Même chose que pour la Figure précédente, mais pour le sujet 10.

Nous avons évoqué au protocole précédent deux sujets dont l'un était très fluide (utilisateur de la portée de six mètres en permanence) et l'autre de trajectoire plus saccadée utilisant la portée de quatre mètres avec des scores équivalents. Ce sont justement les sujets 10 et neuf. On peut remarquer que le sujet fluide a plus de contacts(10) (cf. figure 4.37) que le sujet non fluide (neuf), pouvant laisser supposer une plus grande fatigue cognitive liée aux processus mis en œuvre pour assurer la fluidité. Par contre le sujet fluide a été plus rapide, réalisant 55 traversées au lieu de 44, il faut donc considérer qu'il a fait (44/55) fois 10 contacts soit huit contacts ce qui reste supérieur à cinq.

Si on calcule le taux d'obstacles ayant engendré une collision par rapport au nombre d'obstacles franchis, on trouve en moyenne un pourcentage de 9,3% avec un écart type de 6,13%..

Conclusion, Concernant notre hypothèse : La canne électronique engendre une perte de performance dans la durée due à la fatigue mentale des utilisateurs.

Nous avons deux arguments pour conclure que non sur une durée de 20 minutes. Le taux de collisions ne s'est pas dégradé avec le temps. Le taux d'évitement de 9,3% est très proche de celui trouvé dans la navigation simple qui était de 9,25 %. Il semble qu'un taux de collisions ou plutôt de frôlements de 10% (car les collisions sont rares à la canne électronique) semble être la fiabilité conjointe de l'outil et de l'utilisateur. Nous chercherons dans la discussion générale à séparer les causes d'erreur provenant de l'outil ou de l'utilisateur.

IV.3. Analyse synthétique des performances des non-voyants avec TP3 sur l'ensemble des expériences

IV.3.1. Les variables retenues

Résumons la signification et le contexte dans lesquels ont été prélevées les variables d'intérêt retenues dans cette analyse synthétique des performances des non-voyants avec le TP3 sur l'ensemble des expériences de cette thèse.

Protocole : choix de passage

Variable : **ChoixPasJuste_Bar** : il s'agit du nombre de passages correctement pris dans l'expérience où l'on devait passer à droite ou à gauche d'un des trois obstacles de largeur différente (largeur 50cm, Largeur 1m, largeur 1,5m) situé à quatre mètres de la personne. Réussir le test consistait à prendre le bon passage, il n'y avait aucune contrainte de temps. Nous n'avons donc pas retenu la variable durée du passage car elle n'a pas été optimisée par les sujets.

Protocole : Perception de la passabilité d'une ouverture

Le but de l'expérience était de savoir si les personnes arrivaient à évaluer à distance de manière correcte la largeur de l'ouverture nécessaire au passage de leur corps. Leur seule consigne était de passer l'ouverture si elle était assez large et de la contourner sinon. Il va de soi que pour un utilisateur de canne électronique on attend dans tous les cas un passage sans frôlements ni collisions. Nous avons observé les frôlements et collisions aussi bien dans la traversée du passage que dans le contournement du mur. La variable **Aff-contour-nocoll** concerne les contournements du mur faits sans collisions, la personne a dû quitter sa ligne droite pour contourner le mur puis la retrouver pour aller toucher le buzzer qui est dans l'axe initial de la marche. Ce contournement implique un changement de direction au niveau du mur compris entre 60 et 90°. L'ampleur du changement de direction va dépendre de l'anticipation pour prendre la décision de contournement. Nous introduisons donc la variable **Aff_Dist_decision** qui est la distance au mur à laquelle la personne prend la décision de contourner ou non le mur. La variable **Aff-nofro** concerne les traversées de passages effectuées sans frôlements et traduit donc la qualité du centrage de la trajectoire dans l'ouverture. Les changements de direction sont très faibles pour ajuster son centrage, typiquement de quelques degrés.

Protocole : Navigation simple au milieu de nombreux obstacles

Slalom_Bar10 est une variable qui prend en considération à la fois le niveau de difficulté atteint dans le slalom et la vitesse de réalisation du slalom. Il n'est pas possible de séparer le niveau de

difficulté et la vitesse à cause de la structure même du protocole. En effet, en première partie de protocole on demande aux sujets de réaliser un slalom de difficulté croissante avec juste une limite de temps peu restrictive qui correspond à une vitesse de 0,55 m/s, inférieure à une vitesse de marche normale. Pour ceux qui ne sont pas arrivés au niveau maximum, on prendra le temps du niveau de difficulté le plus élevé atteint, pour ceux ayant atteint le niveau maximum, on leur demande d'aller le plus vite possible. Il est nécessaire de combiner vitesse et niveau, sinon quelqu'un ayant fait le dernier niveau lentement pourrait être considéré plus lent que quelqu'un s'étant arrêté plusieurs niveaux avant avec une meilleure vitesse. Les déviations pour exécuter le slalom sont entre 0° (cas de passages alignés) et 30° obstacles doubles en quinconce.

Protocole : Navigation répétée au milieu de nombreux obstacles

La variable **Endur-BarVit** concerne la vitesse de réalisation du trajet d'endurance, comme la limitation était un temps de 20 minutes, elle se traduit par la longueur du trajet.

La variable **Endu-BarEvit** concerne le nombre d'obstacles passés sans frôlements ou collisions effectuées, il est corrigé au prorata de la distance effectuée.

Protocole : Pointage locomoteur vers un objet distant

Nous n'avons pas retenu les distances car on verra dans la discussion générale qu'en statique la précision sur la perception des distances est moindre qu'en dynamique. En effet dans le déplacement on perçoit un obstacle la première fois à une distance proche de la portée choisie et on peut donc connaître plus précisément sa position par « spatial updating » qu'à l'arrêt où on est très limité par la faible résolution spatiale du dispositif.

La variable **Locom_Bardev** concerne l'erreur de direction entre celle du poteau et celle prise par l'individu. Elle peut provenir d'une mauvaise prise de direction au moment du démarrage, d'une mauvaise prise de direction par le pointage du faisceau ou d'un défaut de ligne droite.

IV.3.2. Analyse factorielle exploratoire

Une analyse en composantes principales (ACP) a été menée sur les variables présentées dans la section précédente, après avoir exclu des données d'un sujet (sur les 13 participants non-voyants) dont les valeurs se retrouvaient à zéro dans plusieurs variables de barèmes, ce qui créait des corrélations quelque peu artificiellement dans les données.

Le tableau 4.7 d'inter-corrélation des variables d'intérêt calculées sur les 12 non-voyants est présenté ci-dessous (en rouge gras les corrélations significatives, et en rouge non gras les corrélations marginales (pas très important) $p < 0.10$), suivi des graphes pour les corrélations significatives, et des résultats de l'ACP voir figure 4.38 et tableau 4.8 ci-dessous.

Tableau 4.7: inter-corrélation des variables d'intérêt calculées sur les 12 non-voyants (en rouge gras les corrélations significatives, et en rouge non gras les corrélations marginales $p < 0.10$ * $p < .05$).

		Pearson's r	p
ChoixPassJuste_Bar	- Aff_contour_nocoll	-0.28705	0.36566
ChoixPassJuste_Bar	- Aff_Dist_decision	-0.10387	0.74803
ChoixPassJuste_Bar	- Aff_nofrol	-0.05158	0.8735
ChoixPassJuste_Bar	- Slalom_Bar10	-0.18371	0.56763
ChoixPassJuste_Bar	- Endur_BarVit	-0.18348	0.56813
ChoixPassJuste_Bar	- Endur_BarEvit	0.4164	0.17815
ChoixPassJuste_Bar	- Locom_BarDev	0.7101**	0.00967
Aff_contour_nocoll	- Aff_Dist_decision	0.70793**	0.00999
Aff_contour_nocoll	- Aff_nofrol	-0.48823	0.10731
Aff_contour_nocoll	- Slalom_Bar10	-0.06602	0.83846
Aff_contour_nocoll	- Endur_BarVit	0.09896	0.75963
Aff_contour_nocoll	- Endur_BarEvit	0.28188	0.37474
Aff_contour_nocoll	- Locom_BarDev	-0.11395	0.72438
Aff_Dist_decision	- Aff_nofrol	-0.52889	0.07706
Aff_Dist_decision	- Slalom_Bar10	0.08885	0.78364
Aff_Dist_decision	- Endur_BarVit	-0.14536	0.65216
Aff_Dist_decision	- Endur_BarEvit	0.49216	0.10409
Aff_Dist_decision	- Locom_BarDev	0.17078	0.59564
Aff_nofrol	- Slalom_Bar10	0.58505*	0.04569
Aff_nofrol	- Endur_BarVit	0.49486	0.10192
Aff_nofrol	- Endur_BarEvit	-0.27597	0.38526
Aff_nofrol	- Locom_BarDev	0.24164	0.44926
Slalom_Bar10	- Endur_BarVit	0.67012*	0.0171
Slalom_Bar10	- Endur_BarEvit	-0.03546	0.91289
Slalom_Bar10	- Locom_BarDev	0.30144	0.34102
Endur_BarVit	- Endur_BarEvit	-0.2532	0.42717
Endur_BarVit	- Locom_BarDev	-0.08565	0.79127
Endur_BarEvit	- Locom_BarDev	0.54385	0.06758

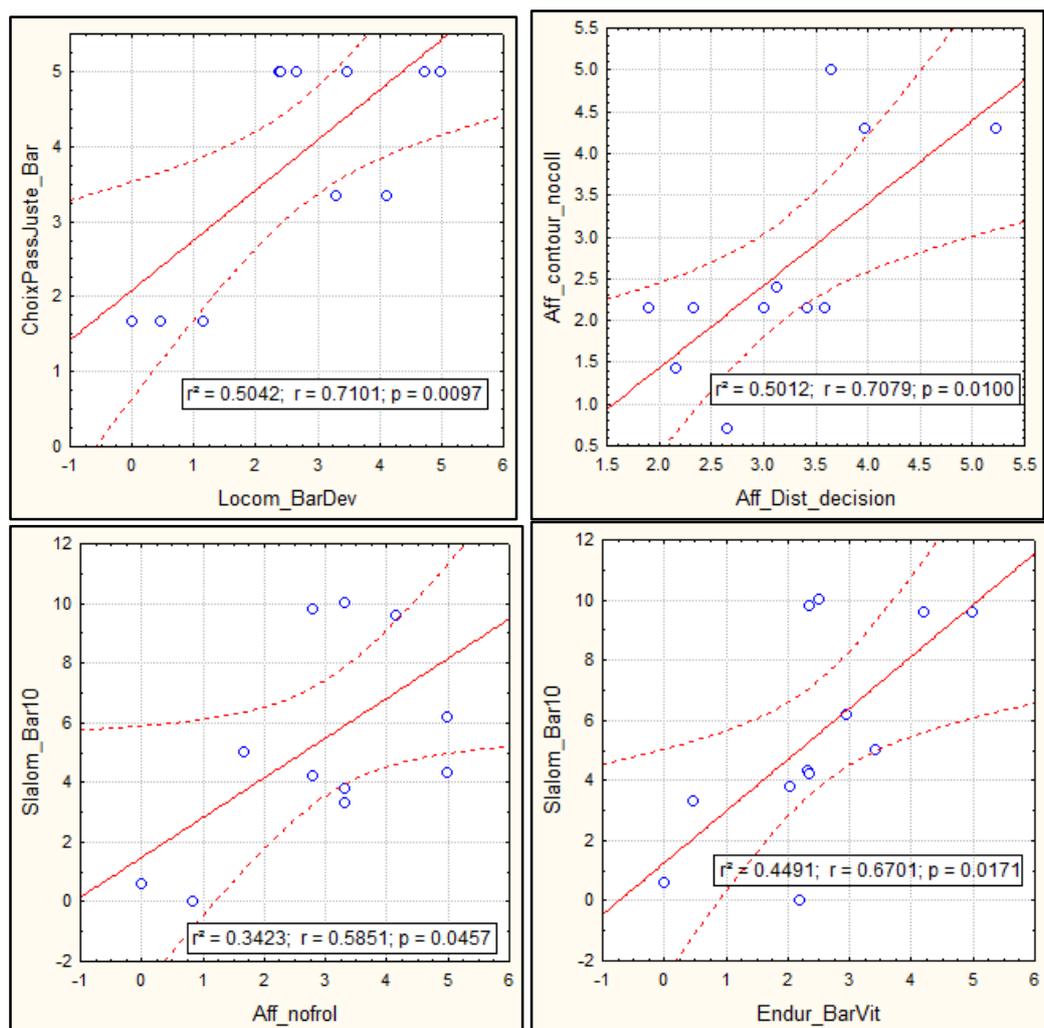


Figure 4.38 : Illustration graphique des quatre corrélations significatives parmi les variables retenues pour l'ACP.

Variable	Anticipation de l'action 1	Perception égocentrée des directions 2	Vigueur du mouvement 3
ChoixPassJuste_Bar	-0.238	0.843	-0.220
Aff_contour_nocoll	0.897	-0.171	-0.002
Aff_Dist_decision	0.921	0.159	-0.029
Aff_nofrol	-0.575	0.073	0.712
Slalom_Bar10	0.057	0.104	0.935
Endur_BarVit	-0.009	-0.212	0.842
Endur_BarEvit	0.494	0.707	-0.130
Locom_BarDev	0.009	0.934	0.214
Var. Expl.	2.287	2.198	2.201
Prp.Tot	0.286	0.275	0.275

Tableau 4.8 : Résultats de l'ACP sur les variables d'intérêt, avec les poids factoriels supérieur à 0.70 (c'est-à-dire environ 49% de variance partagée entre la variable et le facteur en rouge).

L'ACP a permis d'extraire trois facteurs que nous avons intitulés en cohérence avec les variables qu'ils expliquent en termes de part de variance de la variable. Le 1er facteur regroupe des variables liées à "l'anticipation de l'action", le 2ème des variables liées à "la perception égocentrée des directions", et le troisième regroupe des variables reflétant la "vigueur du mouvement".

Le facteur "anticipation de l'action" explique le lien entre la distance d'anticipation d'un obstacle et l'absence de collision sur ce dernier. Nous verrons dans la discussion générale pourquoi anticiper de loin permet de faciliter l'évitement.

La 2ème composante de l'ACP renvoie à la "perception égocentrée des directions" comme le suggèrent les variables qui saturent ce Facteur 2. En effet, choisir le bon passage demande une analyse des dimensions angulaires apparentes, le pointage locomoteur est directement lié à la perception d'une direction. Le lien avec un faible taux de collision dans l'endurance (navigation répétée) est moins évident à expliquer et sera commenté dans la discussion générale.

Le troisième facteur a été intitulé "vigueur du mouvement". La vigueur du mouvement reflète la variabilité interindividuelle dans la vitesse d'exécution des actions, comme par exemple le mouvement du bras ou la marche (Labaune et al., 2020; Reppert et al., 2018). En effet, la variable concernant le score en navigation simple inclut une partie des points pour l'absence de frôlement pour de faibles angles de déviation pour l'évitement d'obstacles (pour 50%) et l'autre partie des points concerne la vitesse de marche (pour les 50% restants). Il est donc logique de trouver un lien avec le passage dans l'ouverture sans frôlement pour le protocole de passabilité (aptitude à bien gérer les évitements à faible déviation) et un autre lien avec la vitesse de marche dans la navigation répétée.

L'interprétation de l'ACP sera reprise plus en détails dans la discussion générale lorsque l'analyse fine de la perception au TP3 dans le mouvement aura été explicitée.

IV.3.3. Analyse de Clustering des performances moyennes

Afin d'examiner si la variabilité interindividuelle dans les valeurs moyennes de performance aux différentes variables étaient liées à un facteur de l'ACP particulier nous avons utilisé une classification non hiérarchique de type K-mean avec $K = 2$ (Johnson & Wichern, 2007, p. 696). Les résultats illustrés dans la Figure 4.39 ci-dessous indiquent que l'effet des sujets sur les moyennes des variables est surtout dû aux trois variables du Facteur "Vigueur du mouvement" de l'ACP, et à celle de la précision angulaire du pointage locomoteur.

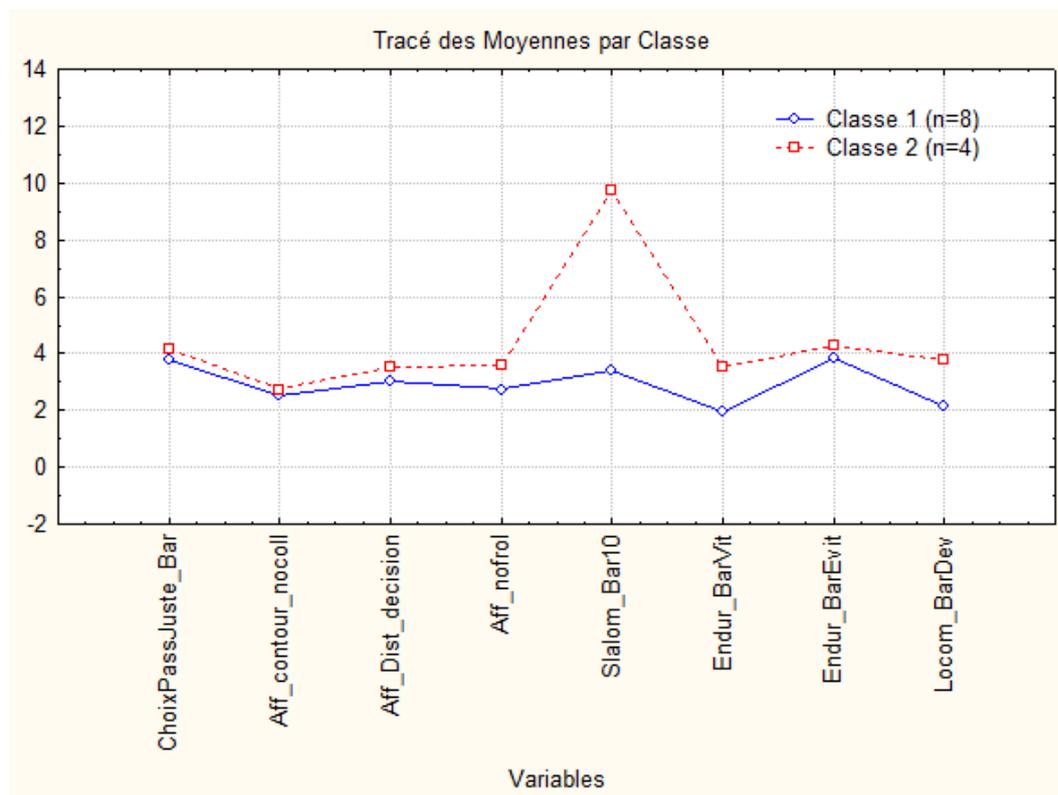


Figure 4.39 : Illustration des moyennes par Cluster pour chaque variable retenue pour l'ACP.

V. Discussion générale

V.1. Introduction

Avant d'aborder le lien entre les différentes expériences, certaines statiques, d'autres dans le mouvement, il est indispensable de se confronter au flux d'information reçu par la personne non voyante avec le TP3 qui est à la fois échantillonné dans le temps à cause du balayage du faisceau et dans l'espace par la résolution en distance limitée de l'interface homme-machine. Le flux d'information est d'une part de nature artificielle produite par un capteur, et d'autre part d'origine naturelle, les deux se fusionnant :

- L'utilisateur maîtrise sa prise d'information car c'est sa main qui pointe le capteur.
- L'information de la direction du pointage lui revient par la proprioception de la flexion extension de l'articulation du poignet.
- Cette information ne peut être juste que si l'appareil est en permanence positionnée verticalement, la perception de la verticalité de l'appareil est également de nature proprioceptive et se travaille pendant les processus de formation de l'utilisateur.
- La prise d'information est standardisée lors du processus de formation, en effet la canne supportant l'appareil est balayée en opposition de phase avec le mouvement des pieds, l'embout en contact avec le sol de la canne couvrant un peu plus que la largeur des pieds.
- L'information artificielle de l'appareil se résume à trois niveaux de vibration : absence de vibration, vibration lisse, vibration granuleuse en fonction de la distance aux obstacles.
- L'utilisateur dispose de l'information kinesthésique de son déplacement et de sa capacité à se représenter l'espace ce qui lui permet de réactualiser la position d'un obstacle par rapport à son corps même s'il n'est plus perçu (« spatial updating »).

L'analyse de ce flux renvoyé par l'appareil, même s'il se limite à trois signaux vibratoires informatifs, n'est pas si simple. L'appareil de base a une très grande précision dans la mesure des distances (plusieurs centaines d'intervalles possibles). En effet, le premier prototype de 1996 (Farcy et al, 1996) était un faisceau laser seul qui découpait la portée entre 30cm et 12m en 600 intervalles de distance avec une échelle grossière musicale sur une oreille et une sous échelle fine sur l'autre oreille. On pouvait détecter la surépaisseur d'un tableau accroché à un mur à cinq mètres de distance, mais cela était totalement inutilisable en déplacement, le cerveau étant saturé par un flux d'information incessant, très complexe à interpréter et donc finalement inexploitable.

Actuellement nous avons réduit de manière totalement volontaire la distance à trois niveaux : «absence de vibration » pour l'espace libre, « vibration lisse » pour obstacle éloigné, « vibration granuleuse » pour obstacle proche. Et nous permettons à l'utilisateur de choisir sa portée entre zéro et un m (usage restreint aux escaliers, ou aux foules denses statiques), zéro et deux mètres (usage limité aux passages très encombrés ou ralenti), ou zéro et quatre mètres (usage le plus courant), ou zéro et six mètres (usage courant dans les espaces dégagés), ou zéro et 12m (recherche occasionnelle de repères dans les espaces vastes). Cette évolution est passé par les étapes suivantes : 600 niveaux sonores (0 utilisateur), 32 niveaux sonores (30 utilisateurs), deux niveaux de vibration (150 utilisateurs), trois niveaux de vibration (1000 utilisateurs). Ces chiffres montrent tout d'abord que la marge de progression est encore grande. Ils fournissent également des questions à discuter : pourquoi trois niveaux est-il mieux que deux et moins bien que 32 ? Et

surtout quels sont les processus en jeu : écologiques, cognitifs, un mélange ? Cette question est très importante puisque des processus cognitifs trop exigeants rendront l'usage épuisant et inefficace.

Donc pour revenir au TP3 actuel, celui-ci comprend deux capteurs : l'un à laser rouge à champ très étroit et l'autre à Leds infrarouges de champ plus large. Le second capteur à champ plus large ayant pour rôle de simplifier l'espace en diminuant la résolution spatiale angulaire du premier capteur trop fin et d'augmenter le champ latéral. Pour des raisons liées à la physique des capteurs, le second capteur ne peut pas détecter les poteaux fins très foncés, le premier capteur laser les détecte avec une très bonne résolution spatiale. Le poteau très fin va par ailleurs se traduire par une vibration très courte lors du balayage de la canne, tellement courte que la vibration sera à peine perceptible (temps de mise en route des vibreurs, temps de prise en compte de l'information par le cerveau). Il a été établi empiriquement par l'équipe que la durée minimale d'une vibration pour que le cerveau de l'utilisateur ne la considère pas comme un détail fugitif est de 300ms. Cela va élargir l'angle apparent des objets fins à cause du balayage, mais en général de manière utile comme on le montrera à la suite. Par ailleurs, pour une raison que nous allons également illustrer à la suite, par traitement informatique des données des capteurs les poteaux fins entre quatre et six mètres lors d'un balayage de vitesse standard voient leur détection effacée. Ces derniers ne peuvent être perçus qu'à moins de quatre mètres. On peut cependant les percevoir à six mètres si on balaie lentement.

Nous faisons l'hypothèse que l'information telle qu'elle est présentée actuellement par l'appareil à un taux d'acceptation suffisant pour ceux qui sont devenus des utilisateurs au quotidien, pour pouvoir fusionner avec les sens naturels (notamment la kinesthésie) et être traitée sur le plan cognitif (par la représentation spatiale), voir fournir dans certains cas un **flux d'information écologique** permettant une réponse motrice directe, c'est ce que nous discuterons. Certaines personnes qui ne s'adaptent pas à l'appareil, malgré une capacité à l'utiliser, parlent de fatigue cognitive trop importante. Dans quelles actions peuvent se situer potentiellement la source de fatigue ?

Même si l'information fournie par l'appareil est reproductible, même si tous les utilisateurs ont tous reçu une formation respectant les mêmes principes (Farcy, R; 2020), l'importance des sens naturels et des aspects cognitifs dans le traitement final de l'information et l'action qui en suit produira une variabilité chez les sujets que nous allons discuter. Nous allons donc, dans un premier temps, **synthétiser le contenu du flux d'information reçu par l'utilisateur dans différentes situations en lien avec les protocoles, puis tenter une interprétation des résultats de l'ACP. Nous terminerons sur les limites de l'étude et ses perspectives.**

En préambule, il convient de situer le flux d'information du TP3 au regard d'un flux optique accompagnant le déplacement d'un voyant. Prenons le cas d'un déplacement locomoteur d'un promeneur non-voyant dans la montagne. S'il pouvait voir devant lui, il verrait un flux optique en expansion dont le foyer d'expansion est centré là où il va (a) dans la Figure 5.1. Avec le TP3 il capture durant un bref instant la présence d'un obstacle (a' : zone hachurée en orange gras sur l'obstacle) aussi bien au balayage aller qu'au balayage retour et une portion des obstacles de la zone (b'). Plus tard, quand il est plus proche de l'objet (a'') il capture à nouveau devant lui l'obstacle (zone hachurée en orange plus grande, pour illustrer le retour haptique du TP3

légèrement plus important en durée à cause de l'effet de perspective), par contre les obstacles de la zone (b') se trouvant maintenant en zone (b'') plus décalée angulairement sortent du champ de perception. Nous rentrerons dans les détails des flux intermittents d'informations reçues via le TP3 au travers des illustrations de la section V.2.

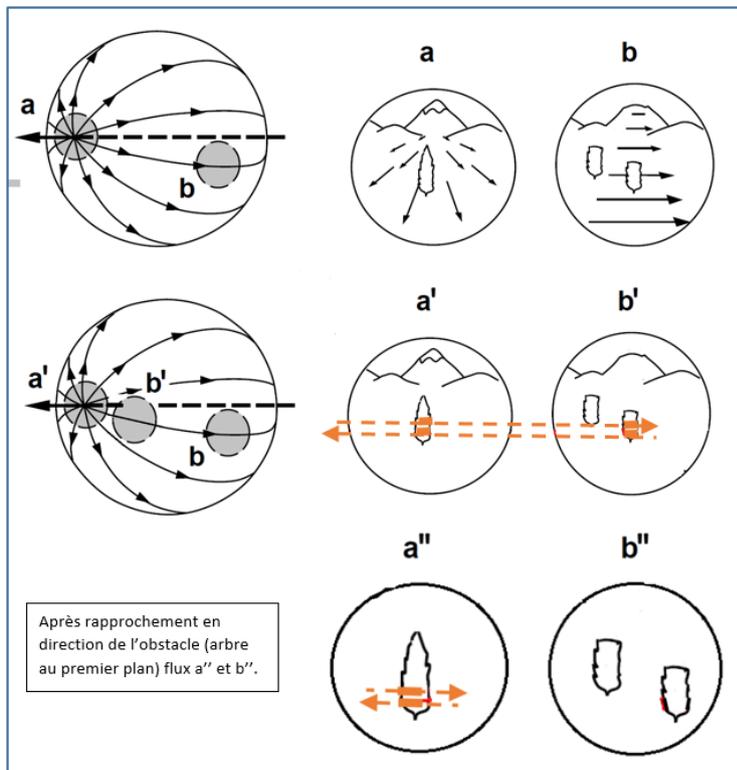


Figure 5.1. Illustration du flux optique accompagnant un déplacement, et de son échantillonnage par la rétine quand on regarde devant soi (a) ou sur le côté (b) durant un déplacement (adaptée de Masson et Mestre, 1998). Pour le Tom Pouce III le champ d'exploration est de -10° à $+10^{\circ}$ la zone (a') se trouve dans le champ central à -3° , $+3^{\circ}$ par exemple et la zone (b') dans le champ latéral de 6° à 12° à titre d'illustration. En orange pointillé, la zone explorée par le faisceau qui ne donne pas de retour vibratoire, en orange gras la zone donnant un retour vibratoire. On remarque qu'en s'approchant des objets on perd la perception des objets latéraux comme pour la vue. Proche de l'obstacle la zone (a'') couvre plus que les -10° à $+10^{\circ}$ de champ et les objets latéraux ne sont plus perçus. La zone (b'') n'est pas explorée par le faisceau laser et donc non perceptible.

Lorsque nous parlerons de représentation spatiale de l'individu (en particulier non-voyant) **pour la régulation de la locomotion**, il est important de souligner que **nous parlons de représentation spatiale en mémoire à court terme**. En effet il s'agit d'une représentation qui ne va rester que quelques secondes en mémoire de travail, le temps entre la perception de l'obstacle et son franchissement⁴. Tout comme celle d'un automobiliste qui a besoin de se représenter la bordure d'un tournant pour ne pas la chevaucher lorsqu'il sera à son niveau, car elle ne lui sera plus visible à ce moment. On distingue **ce type de représentation spatiale fugitive de la représentation spatiale qui sert à gérer un trajet** (par ex., planifier des raccourcis) **ou qui permet de se structurer une scène destinée à être gardée en mémoire pour des réutilisations futures**, cette forme de représentation est très présente dans la littérature (Loomis 2002 et 1993; Rieser 1990). La **représentation spatiale qui sert à planifier un trajet demande une charge de travail cognitif**

⁴ Il y a eu une polémique dans la littérature sur la durée de la représentation spatiale de cibles en mémoire à court terme pour le pointage locomoteur. Thomson (1980) interprète ses données montrant une augmentation catastrophique de la variabilité des pointages locomoteurs pour des cibles situées au-delà de neuf mètres, comme suggérant une limite de 8s à la mémoire spatiale. Steenhuis and Goodale (1988) a montré qu'il ne répliquait pas ce résultat. Thomson (1983) apporte de nouveaux éléments (pointages après un délai de 0, 2, ou 4s), indiquant que c'est une question de distance (augmentant de la variabilité au-delà de 5m) et non pas simplement de durée. Loomis et al (1992) montrent que cette limite n'existe pas, car tout va bien même pour des pointages à des cibles situées de 10 m à 12 m, et mentionnent les travaux de Rieser et al. (1990) montrant aucun problème pour des cibles situées jusqu'à 20 m !

importante car à un instant donné, les informations sensorielles ne fournissent pas l'information sur la globalité du trajet. Pour la représentation spatiale de l'espace immédiat, si le système perceptif à un instant t fournit toutes les données nécessaires à l'action, on dira que le contrôle locomoteur **est potentiellement sur un mode écologique** et fait **peu appel au processus cognitif de la représentation spatiale**. Par contre si le dispositif perceptif ne fournit que des informations partielles, il y aura deux cas. Celui où ces données partielles fusionnées avec d'autres données (kinesthésiques par exemple) vont permettre une construction spatiale fugitive qui permettra de gérer l'action de manière correcte, c'est-à-dire au moindre effort physique et en sécurité au prix d'un effort cognitif de construction spatiale, et le cas où cette fusion se fera mal, ou encore le cas d'une fusion bien faite mais qui ne pourra pas apporter assez d'informations pour faire l'action correcte. A titre préliminaire, avant de commenter les aspects cognitifs de l'usage du TP3, essayons de voir comment présenter ces aspects pour la canne blanche et le chien guide qui sont les instruments de locomotion de base. Nous n'avons malheureusement pas trouvé de littérature abordant ces aspects. On se risquera donc à des hypothèses sans points de repère.

Pour le chien guide : Le chien guide peut apprendre quelques trajets par cœur et les effectuer à partir d'une seule consigne verbale (boulangerie, boucherie, café, etc.). Dans cet usage, c'est comme un taxi, il n'y a pas besoin d'informations ni cognitives, ni écologiques, on suit le chien. Toutefois ce n'est pas l'usage normal du chien qui doit pouvoir faire un trajet pour la première fois sous les consignes de son maître (tourne à droite, cherche le passage piéton, cherche le composteur, etc.). Dans ce cas, le non-voyant gère son orientation globale (carte mentale de son trajet) comme un conducteur de voiture sans GPS, sauf qu'il utilise des repères différents pour se situer dans son trajet (auditifs, olfactifs, podotactiles, demande de renseignements aux passants, etc.). L'utilisateur de chien guide dans ce cas doit mettre en œuvre toute la gestion cognitive d'un trajet par indications, analyser les carrefours (car c'est lui qui donne l'ordre de traverser pas le chien). Par contre pour les obstacles, le chien les évite sans qu'il sache ce qu'il évite, il doit faire confiance au chien. On dira donc en résumé que la gestion cognitive de la cartographie globale est classique comme pour un piéton voyant (sauf qu'elle est plus compliquée techniquement à trajet équivalent), mais qu'il n'y a pas de flux d'information sur les obstacles immédiats, donc pas d'aspect ni écologique, ni cognitif.

Pour la canne blanche : L'aspect gestion de la cartographie globale du trajet est le même que pour le chien guide. A cette gestion se rajoute la gestion des obstacles qui se fait par contact avec la canne ou le corps. Pour contourner l'obstacle touché à la canne, il faut prendre conscience de sa direction, de sa distance, car l'obstacle peut toucher le bout de la canne ou le milieu de la canne, le bruit fait par la canne sur l'obstacle aide également à l'identifier. Suivant les situations on peut avoir un flux écologique, la canne touche une bordure de trottoir, événement très habituel, la direction se corrige instantanément, le trottoir agissant comme guide. Dans d'autres cas, l'obstacle étant inhabituel, une analyse cognitive est indispensable pour le contourner dans encombrés (un poteau de feu mal analysé peut engendrer une collision de la tête sur les petits feux bas en le contournant par exemple).

V.2. Description et interprétation du flux d'échantillonnage spatio-temporel fourni par l'appareil

Afin de pouvoir conclure sur les aspects cognitifs ou écologiques des différentes actions motrices que le non-voyant réalise, il faut confronter l'action motrice au flux informatif reçu. Ce flux dépend des actions à faire, nous présentons ici des situations de base qui recouvrent une bonne partie des actions courantes.

Cas n°1 : Sujet à l'arrêt face à un obstacle cherchant un passage en balayage lent

Lorsqu'il faut localiser la direction d'un poteau dans l'espace, l'information de la proprioception du poignet de l'utilisateur joue un rôle important dans la perception de la direction d'un objet dans un référentiel égocentré. Prenons le cas d'un sujet à l'arrêt, il allume son appareil et explore l'espace lentement pour trouver un passage en portée six mètres avec un obstacle situé entre deux et six mètres. Un objet entre deux et six mètres fournira une vibration lisse. Il y a donc quatre mètres d'incertitude sur la distance dans cet intervalle. La largeur angulaire de l'objet perçue par la flexion extension du poignet (seule articulation à bouger lors du balayage selon les principes de la formation) est limitée par la finesse de la proprioception de la personne. Mais la largeur réelle de l'objet n'est pas connue car la distance est trop imprécise. Par contre la direction pour frôler l'objet est connue (direction du début de la disparition de la vibration). **Le protocole « pointage locomoteur » a montré cette capacité de détermination de la direction avec une précision fonctionnelle à la modalité Tom Pouce III.** Par contre, trouver la direction de l'extrémité de l'obstacle n'est pas suffisant pour pouvoir l'éviter sans le frôler ou sans le contourner de manière excessive (ce dernier comportement rendant la déambulation impossible en milieu encombré). En effet la marge de sécurité dans la direction à prendre pour éviter de frôler l'objet avec les épaules, sous l'hypothèse que la main tenant la canne est centrée au milieu du corps (recommandation donnée avec insistance pendant la formation), est la demi largeur des épaules, soit environ 30 cm.

Si le capteur laser était seul (figure 5.2), la direction à prendre avec la marge de sécurité est mal connue car la distance est mal connue. **Si l'objet est très proche, il faudra prendre plus de marge de sécurité angulaire que si l'objet est loin**, mais l'utilisateur n'a pas les moyens de le savoir. Par contre **avec le capteur infrarouge si l'objet est proche, la marge de sécurité sera fournie par le capteur infrarouge** (figure 5.3), si l'objet est à six mètres, la marge de sécurité est insuffisante (figure 5.3) mais quand la personne va se rapprocher de l'objet le faisceau infrarouge demandera une correction de trajectoire pour assurer une marge de sécurité suffisante. L'utilisateur a uniquement à se préoccuper de se diriger vers la direction frontière entre vibration et non vibration.

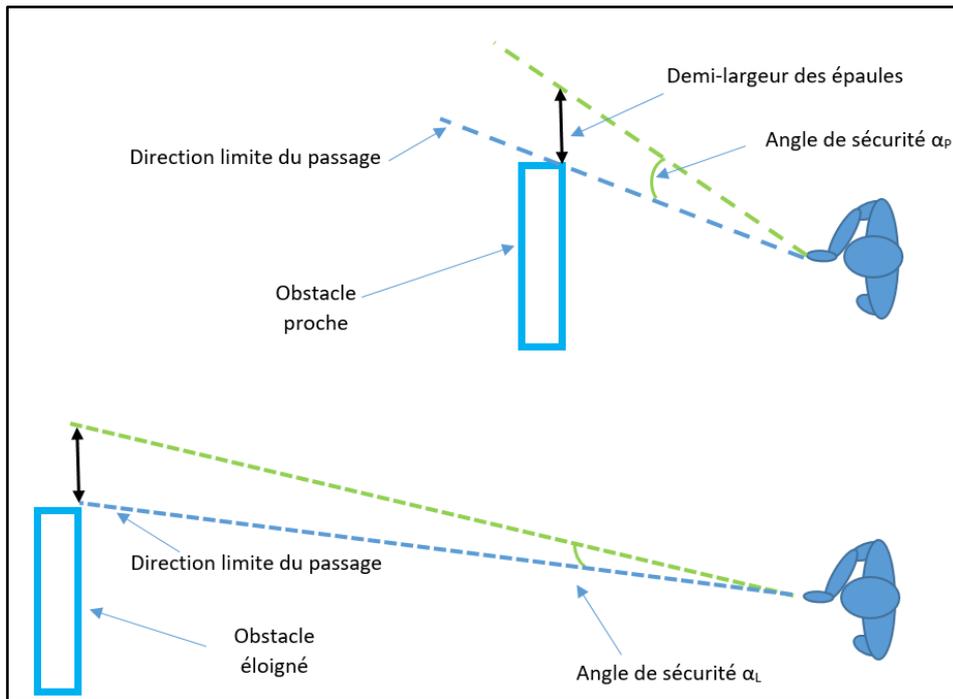


Figure 5.2 : la marge de sécurité angulaire dans la prise de direction α_L pour un objet lointain est inférieure à celle α_p pour un objet proche. Il n'est pas possible d'ajuster la marge de sécurité sans connaissance précise de la distance avec le faisceau laser seul.

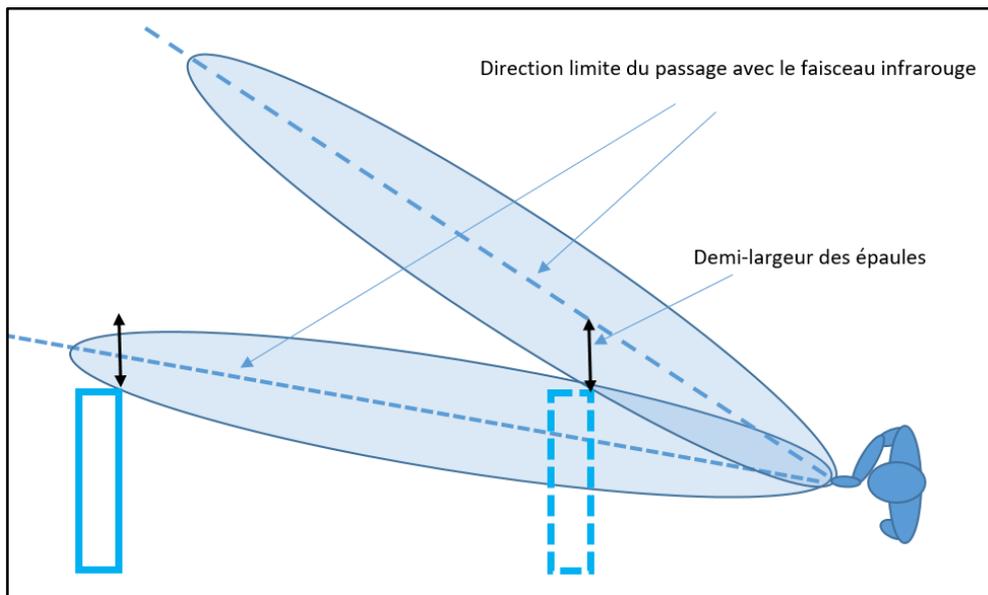


Figure 5.3 : la marge de sécurité est totalement incluse dans la largeur du faisceau infrarouge à courte distance et partiellement à grande distance.

Le faisceau infrarouge permet de par sa forme d'inclure une marge de sécurité qui rend la direction à prendre (incluant la marge de sécurité) moins dépendante de la connaissance de la distance de l'objet. Le balayage étant supposé lent et l'obstacle large, on n'a pas considéré l'effet de la durée minimale de vibration de 300ms qui aurait été négligeable voire inexistante. **Le faisceau infrarouge présente l'intérêt de fournir la bonne direction avec la marge de sécurité sans avoir un travail cognitif à faire.** Dans les versions de l'outil jusqu'à 2006, l'utilisateur avait

un signal sonore à 32 niveaux de distance, et une notion précise de la distance avec uniquement le faisceau laser. Ce dernier pouvait par représentation spatiale et entraînement en déduire lui-même la marge de sécurité. Cela fonctionnait très bien, mais avec peu de personnes et plus difficilement en enchaînant plusieurs heures de déambulation consécutives. **Grâce au faisceau infrarouge, la détection de la direction du passage en bordure d'obstacle est une perception de nature écologique (Gibson & Gibson, 1955).** On peut considérer que le faisceau infrarouge a rendu la détermination de la direction d'évitement plus « écologique ».

La question qui se pose maintenant : pourquoi on a deux niveaux de vibration lisse et granuleux et pas un seul niveau ? Il y a deux raisons, la principale est de permettre la gestion des chicanes qui n'a pas été abordée ici (Farcy, R., 2020). La seconde est de fournir un signal d'urgence qui normalement ne doit pas apparaître si les anticipations pour les évitements ont été faites correctement.

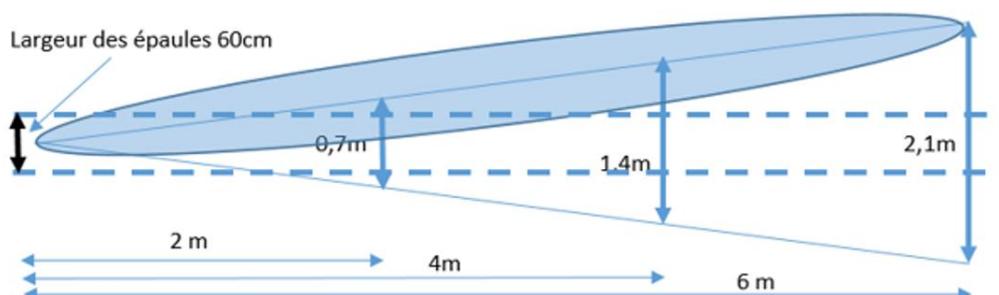
Cas n°2 : Cas d'un sujet en déplacement standard (vitesse 1m/s, balayage centré de 20° d'amplitude synchronisé avec les pas, longueur des pas 60cm, durée 0,6s) : précision de la distance perçue à l'obstacle.

Regardons tout d'abord le champ de perception du à l'angle de balayage. **Il ne peut pas être rétréci à moins de [-10°, +10°]** car sinon l'embout de la canne ne balaie plus assez large pour protéger les pieds des dénivelés. Si on augmente la largeur au-delà de cette valeur on rencontre les inconvénients suivants :

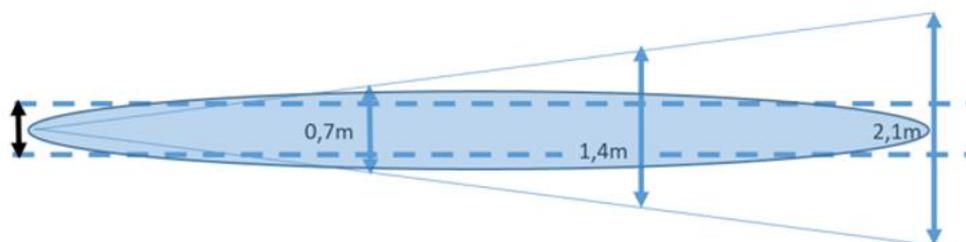
- le mouvement du poignet est plus rapide et donc plus fatiguant.
- La quantité d'information est plus importante car le champ est plus large, donc cela implique plus de fatigue cognitive, un champ de perception large ne fournit pas d'information utile à grande distance car on perçoit alors des obstacles trop éloignés de la trajectoire.
- Si le faisceau laser passe trop vite sur des obstacles noirs très fins, ils peuvent ne pas être détectés car l'énergie lumineuse renvoyée sera globalement insuffisante.

La largeur de l'espace contrôlé dépend de la distance, résumons les valeurs pour un balayage de -10°, +10° (cf. figure 5.4).

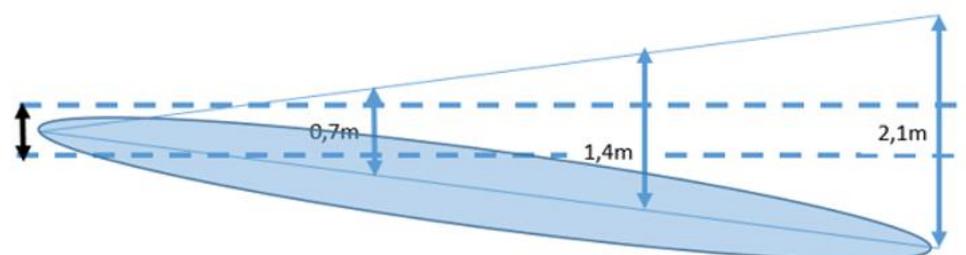
t=0s,



t=0,3s



t = 0,6s



t=0,9s etc.

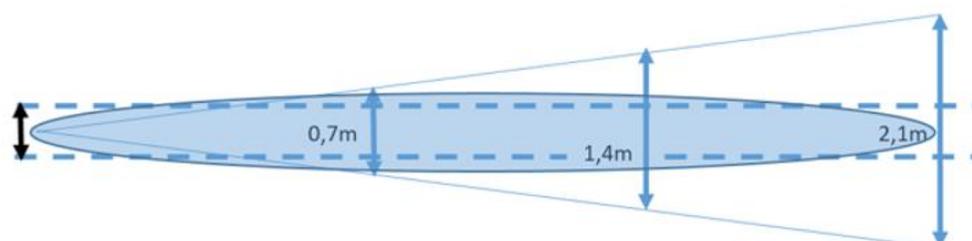


Figure 5.4 : échantillonnage de l'espace en avançant

Traisons tout d'abord le cas de la personne avançant face à un mur en portée de six mètres. Pendant la durée d'un pas, soit une distance de 60cm, le champ d'exploration de 20° est couvert. Un obstacle large à six mètres de distance déclenche une vibration sur tout le champ dès qu'il se trouve à six mètres de la personne. La connaissance de la distance est précise à ce moment. Si la personne continue à avancer elle reçoit toujours une vibration lisse. Prenons le cas d'une personne n'ayant aucune mémoire spatiale, pour cette personne il y aura des obstacles partout dans son champ de perception entre deux et six mètres. Pour une personne ayant mémorisé l'existence du mur par représentation spatiale au moment où il est apparu par la vibration arrivant soudainement dans la largeur angulaire de son balayage, l'information kinesthésique de sa marche fait qu'elle sait que le mur se rapproche d'elle avec une précision dépendant uniquement de la précision de sa kinesthésie (**spatial updating**). L'existence et l'efficacité de cette

information kinesthésique fait l'objet de plusieurs hypothèses comme on l'a vu dans l'état de l'art (Mittelstaedt & Mittelstaedt, 1980). Même si elle dévie à droite par exemple pour éviter le mur, elle gardera une connaissance de la position en orientation et distance du mur sur son côté gauche même si elle ne le perçoit plus que de façon intermittente lorsque le balayage va à gauche.

Traisons maintenant le cas d'une personne avançant vers un poteau situé dans le champ latéral (figures 5.5 et 5.6) en portée de six mètres. L'incertitude sur la position du poteau, contrairement au mur, est dans ce cas de deux pas, soit 1,2m. En effet considérons le cas de la figure 5.5 où le faisceau rencontre le poteau à six mètres juste au moment où le balayage est dans sa direction, il est détecté à six mètres.

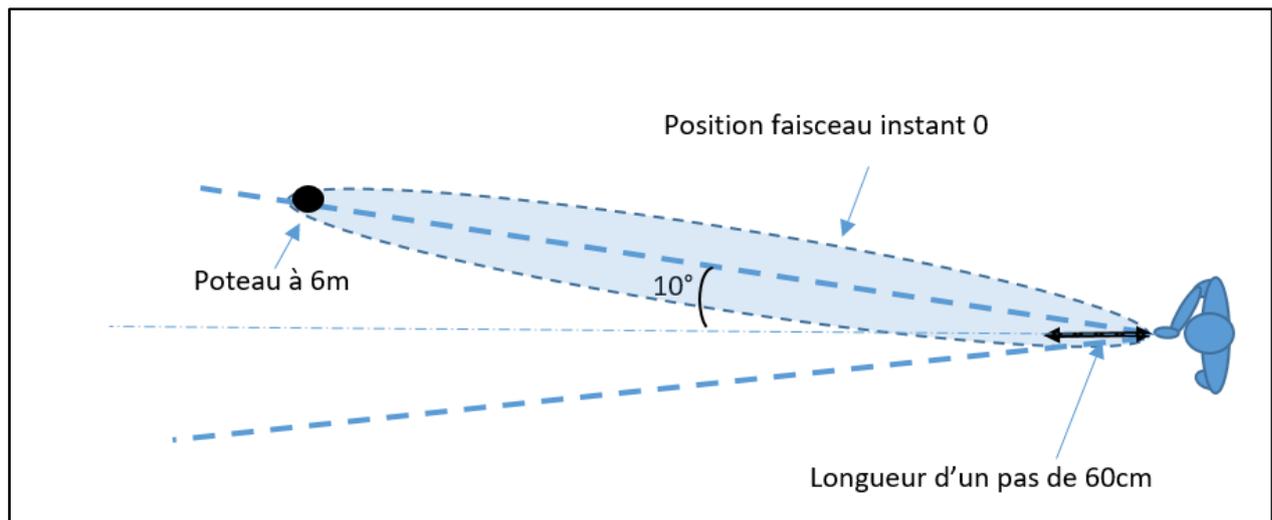


Figure 5.5 : poteau fin détecté à six mètres.

Prenons maintenant l'autre cas extrême où le poteau se trouve à 6,1m de l'utilisateur quand celui-ci pointe dans sa direction (figure 5.6), il ne sera pas détecté à l'instant zéro. Il ne sera détecté que 1,2 s plus tard lorsque le faisceau revient dans sa direction, l'utilisateur aura avancé de deux pas et le poteau est alors à 4,8 m (ce sont des valeurs approchées car mathématiquement on a ajouté des longueurs qui font un angle de 10° entre elles, mais le calcul de la valeur précise ne change rien aux conclusions). C'est une limitation du dispositif. Elle n'est pas du ressort de la physique du capteur car le télémètre à l'information à quelques centimètres près. Mais transmettre cette information à l'utilisateur comme cela a été fait dans le passé rendait les évitements encore plus aléatoires dans la durée à cause de la charge cognitive que représentait cette information artificielle trop riche.

L'imprécision sur la distance pour les objets latéraux ne peut être compensée ni par la mise à jour des informations spatiales durant la marche, ni par une représentation de l'espace, l'utilisateur n'a pas de moyens de compenser cette perte de précision. Cela reste un choix volontaire de l'interface qui à basse résolution représente un moindre mal par rapport à la connaissance précise de la distance à l'objet par une interface de haute résolution.

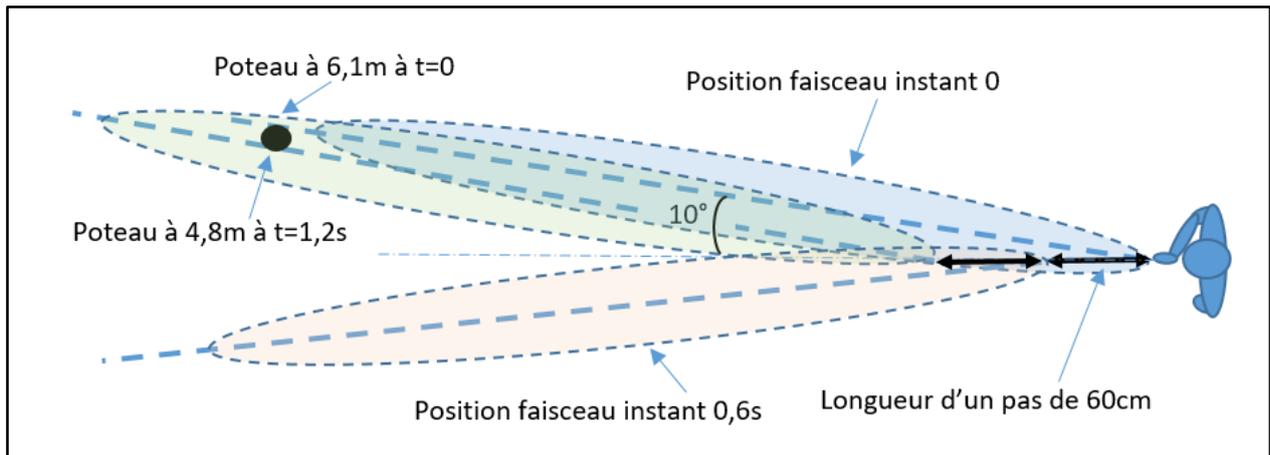


Figure 5.6 : Configuration où le poteau est détecté à 4,8m.

L'utilisateur peut uniquement connaître la distance au poteau avec une précision de deux pas, soit environ 1,2 m s'il s'agit **d'un poteau fin en extrémité de champ latéral de perception**. Si le **poteau est au centre du champ**, il sera perçu forcément à chaque pas, la précision sera alors de 60 cm. Un second problème apparaît, si le poteau est noir et fin (cas courant des poteaux anti-stationnement) et donc détectable uniquement au laser, il est perçu en extrémité de champ entre 4,8m et six mètres, lors de l'aller-retour suivant il sera situé entre 3,6 m et 4,8 m et sera hors du champ de perception de l'utilisateur (figure 5.7).

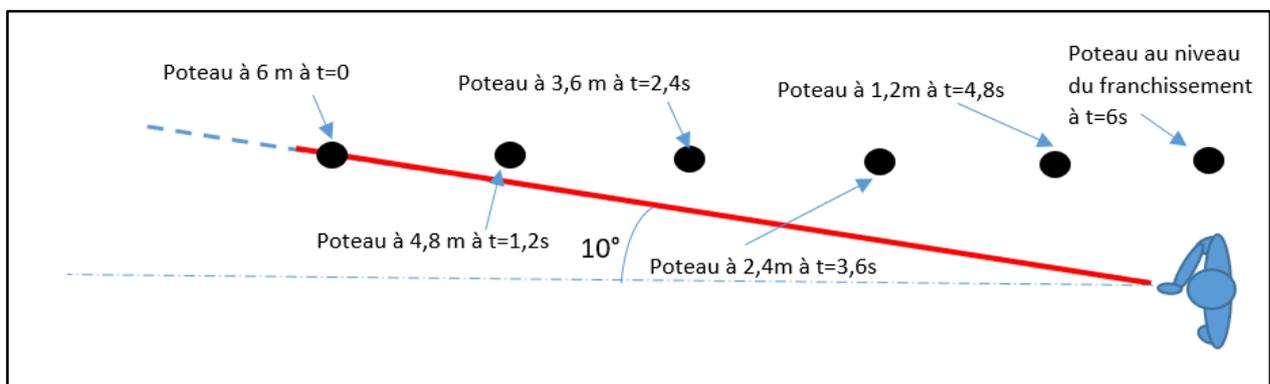


Figure 5.7 : Cas d'un poteau fin foncé en limite de champ perceptif perçu une seule fois à grande distance.

Le poteau n'est perçu qu'une seule fois, comme il est latéral si la personne reste en ligne droite, cet obstacle est hors trajectoire donc ne pose pas de problème. Ce poteau peut être mis en représentation spatiale avec une incertitude de deux pas et si cette représentation fait l'objet d'un "spatial updating" qui est actif pendant au moins cinq à six secondes avant oubli de l'obstacle, l'utilisateur saura qu'il a un poteau qu'il risque de toucher à droite s'il tourne à droite. Maintenant, sauf pour un utilisateur très concentré, il est très probable que l'information sorte de sa mémoire spatiale. Dans ce cas si à cause d'un obstacle arrivant plus tard ou d'un évènement la personne est amenée à changer fortement de direction, elle peut se trouver nez à nez avec un poteau dont elle a oublié l'existence et ne pas pouvoir l'éviter car déjà trop proche au niveau de la canne, ou alors hors du champ de perception de l'appareil car proche et latéral ce qui produira un frôlement ou une collision d'épaule. Ce problème a été constaté dans les rues à forte concentration de poteaux noirs fins, ou des utilisateurs faisaient des collisions d'épaule avec des

poteaux proches latéraux en changeant de direction à cause d'un poteau ou autre obstacle éloigné. Ce phénomène peut aussi se produire de manière moins flagrante pour des obstacles plus larges que le poteau noir fin. Pendant le processus d'évitement il y a toujours un moment où l'obstacle n'est plus visible alors que l'on ne l'a pas complètement dépassé, ne serait-ce qu'au moment où le capteur a dépassé l'obstacle et que le corps ne l'a pas encore fait.

En résumé, nous formulons l'hypothèse que **les pertes de perception d'objets non encore franchis par manque de champ latéral peuvent être compensées par une représentation spatiale maintenue en mémoire de travail durant cinq ou six secondes. La précision de cette représentation spatiale est limitée par l'incertitude sur la distance pour les objets fins et latéraux qui peut atteindre deux pas.** Remarquons que la marge de sécurité fournie par le faisceau infrarouge pour protéger les épaules n'est pas opérationnelle pour le poteau noir, elle est en partie remplacée par le rallongement à 300ms de la vibration. En effet sur la figure 5.8 lorsque l'on veut dévier à gauche, cela se synchronise naturellement dans un mouvement de balayage de la canne vers la gauche, l'élargissement temporel de la vibration dégage une marge de sécurité pour les épaules.

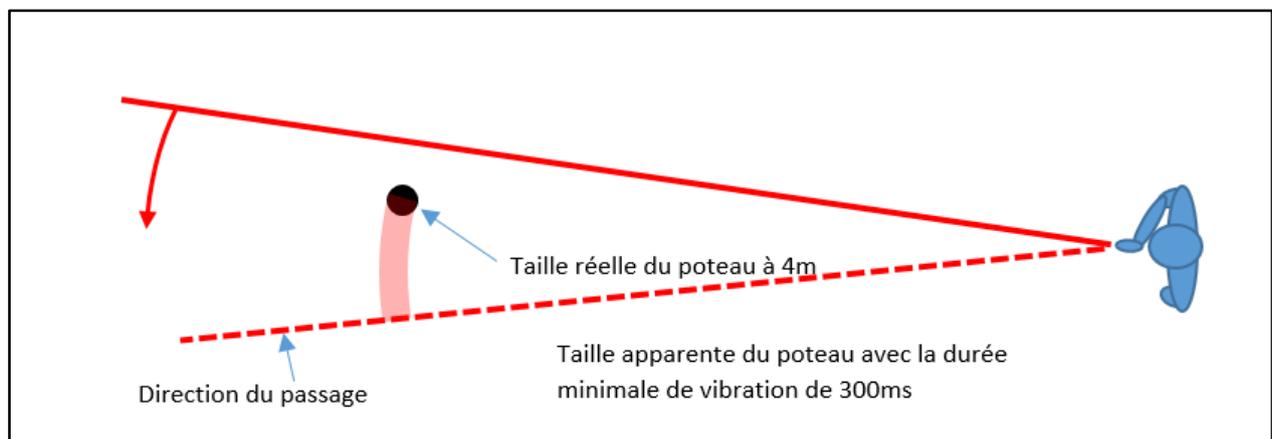


Figure 5.8: Marge de sécurité pour le passage des épaules dans le cas d'un poteau fin noir (cercle noir), taille apparente du poteau noir en rose.

Par exemple pour une distance de 3,5m, 0,3s correspond à 10° , la marge de sécurité est de 60 cm correspondant à la largeur totale des épaules et donc largement suffisante. La marge de sécurité de 30 cm (demi-largeur des épaules) est encore assurée à deux mètres de distance. Un poteau fin ne demande cependant qu'une déviation faible pour être évité correspondant à un peu plus que la demi-largeur des épaules. Entamer cette déviation avec six mètres d'anticipation n'est pas utile car elle pourrait être affectée par un léger défaut de ligne droite. En portée de quatre mètres, un poteau sur la trajectoire est perçu entre 3,4m et quatre mètres, cela permet de prendre à temps la faible déviation nécessaire, et évite d'avoir, de part la limitation de la portée, trop d'obstacles à mémoriser. **C'est pourquoi en situation de balayage normal nous gommons, par logiciel dans l'appareil, les poteaux fins situés entre quatre et six mètres.** Il est cependant toujours possible de les percevoir avec un balayage lent.

Revenons sur la différence entre un poteau élargi par les 300ms de durée de la vibration apparaissant large et un obstacle réellement large. Quand on se rapproche d'un poteau élargi par les 300ms, il garde la même largeur angulaire. Par contre, pour un obstacle réellement large, sa largeur angulaire apparente augmente quand on s'en rapproche. Pour les obstacles de taille

intermédiaire comme ceux de 60 cm utilisés dans la navigation, l'intervalle d'incertitude en distance maximal pour la portée de six mètres pour un obstacle latéral est de :

$2 * (\text{largeur d'exploration} - \text{largeur obstacle}) / (\text{largeur obstacle}) * \text{durée pas} * \text{vitesse de déplacement}$, soit 85cm avec les valeurs de la marche retenue. Pour la portée de quatre mètres on trouve 68 cm.

Pour un obstacle dans l'axe de la marche l'incertitude est plus faible que latéralement, elle vaut $2 * (\text{demi largeur d'exploration} - \text{demi largeur de l'obstacle}) / (\text{demi largeur de l'obstacle}) * \text{durée demi pas} * \text{vitesse de déplacement}$. On trouve pour la portée de six mètres 29cm d'incertitude et pour la portée de quatre mètres 17cm d'incertitude. En résumé, **la précision sur la connaissance de la distance à un obstacle, grâce à la mise à jour des informations spatiales (spatial updating), si on a bien spatialisé sa présence au moment de son apparition, est d'autant meilleure que l'obstacle est large et que la portée est courte.** Par contre une courte portée réduit l'anticipation et on verra au cas n°6 qu'une faible anticipation complique le contournement.

Cas n°3 : Avancée face à un obstacle de 60cm de large dans l'axe de la marche : représentation du flux intermittent d'information reçu, sans et avec déviation.

Représentons sur la figure 5.9 ce que perçoit un utilisateur qui avance sans dévier face à un obstacle de 60 cm de large (largeur utilisée dans les protocoles de navigation). Les paramètres de la marche sont les mêmes que pour le cas n°2. L'échelle des Y est la distance en fonction d'une part de l'angle par rapport à l'axe corporel et du temps. Nous représentons en vert la largeur angulaire réelle de l'obstacle et en rouge la largeur angulaire perçue sous forme de vibrations quand celle-ci est différente de la réalité. **Les largeurs perçues sont également augmentées à cause du faisceau infrarouge, mais pour les longues distances l'élargissement temporel est prédominant.** Nous ne représenterons pas ici cet élargissement qui n'est pas utile pour notre objectif ici qui est de montrer l'échantillonnage temporel (figure 5.9).

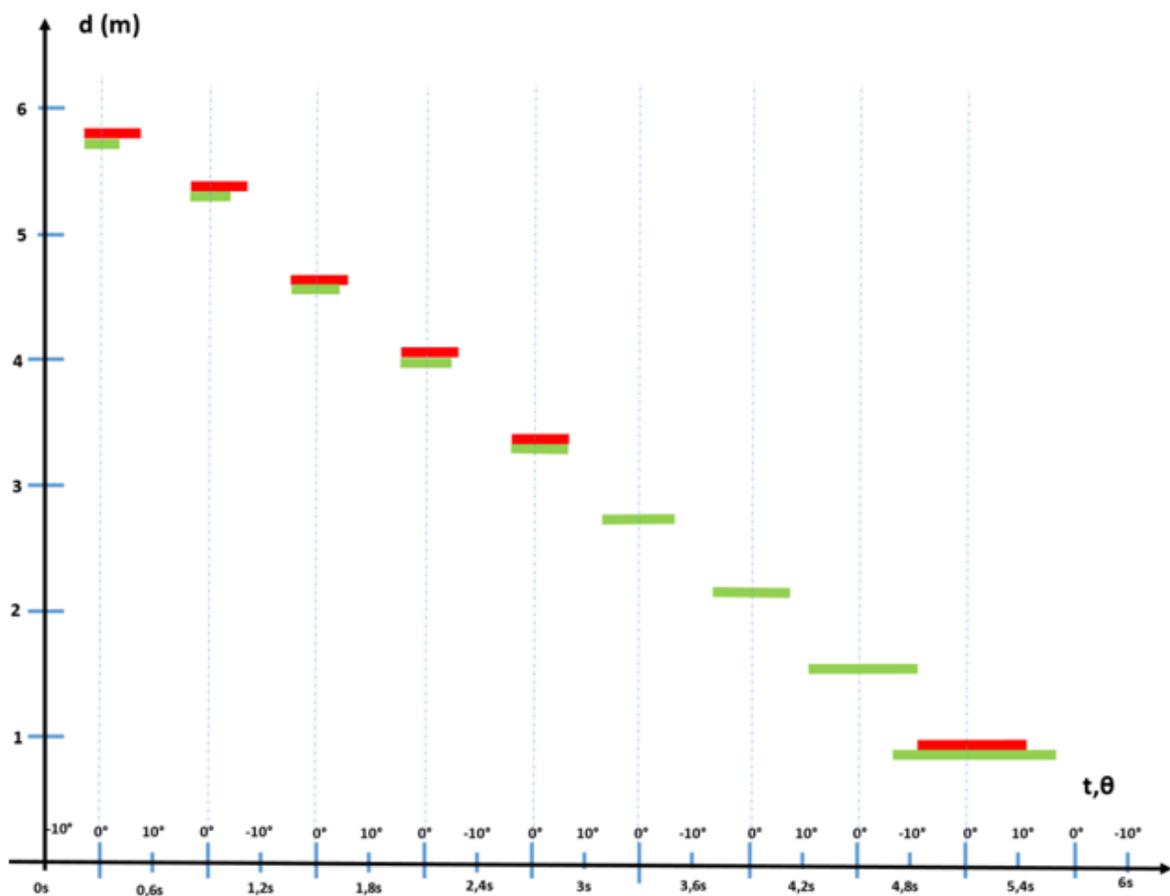


Figure 5.9 : flux intermittent d'informations reçues : en portée de six mètres et en l'absence de déviation l'obstacle de 60 cm de large dans l'axe de la marche est perçu neuf fois avant la collision avec la canne. Avec la portée de quatre mètres il est perçu six fois avant collision avec la canne.

Remarquons que pour être juste dans la représentation graphique des flux intermittents de stimulations reçues, les traits devraient être inclinés sur la droite pour tenir compte de l'avancée de la personne, typiquement un trait de 0,3s de long devrait descendre de 33cm car la vitesse de déplacement retenue est de 1m/s (voir figure 5.10). Nous garderons l'approximation des traits horizontaux de la figure 5.9 par souci de simplicité.

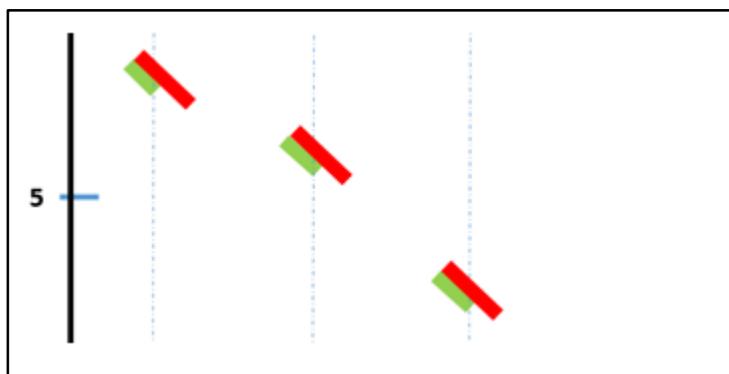


Figure 5.10 : inclinaison des traits afin de tenir compte de l'avancée de la personne.

Analysons un évitement : L'utilisateur apprend lors de sa formation (Farcy, R; 2020) à gérer un obstacle dès qu'il est perçu dans l'axe de la marche, si la portée est de six mètres cela signifie qu'il

y a peu d'obstacles et qu'ils peuvent donc être traités de loin. La déviation peut être initiée dès l'instant 0,5s. Elle devrait être typiquement de 7° à 9° sur la droite, considérons 8° pour le schéma de la figure 5.11. L'obstacle apparaît ensuite en extrémité de balayage gauche uniquement entre -8 et -10° soit sur une amplitude angulaire de 4° uniquement en comptant l'aller-retour à gauche. On négligera ici le ralentissement de la vitesse angulaire en fin de balayage.

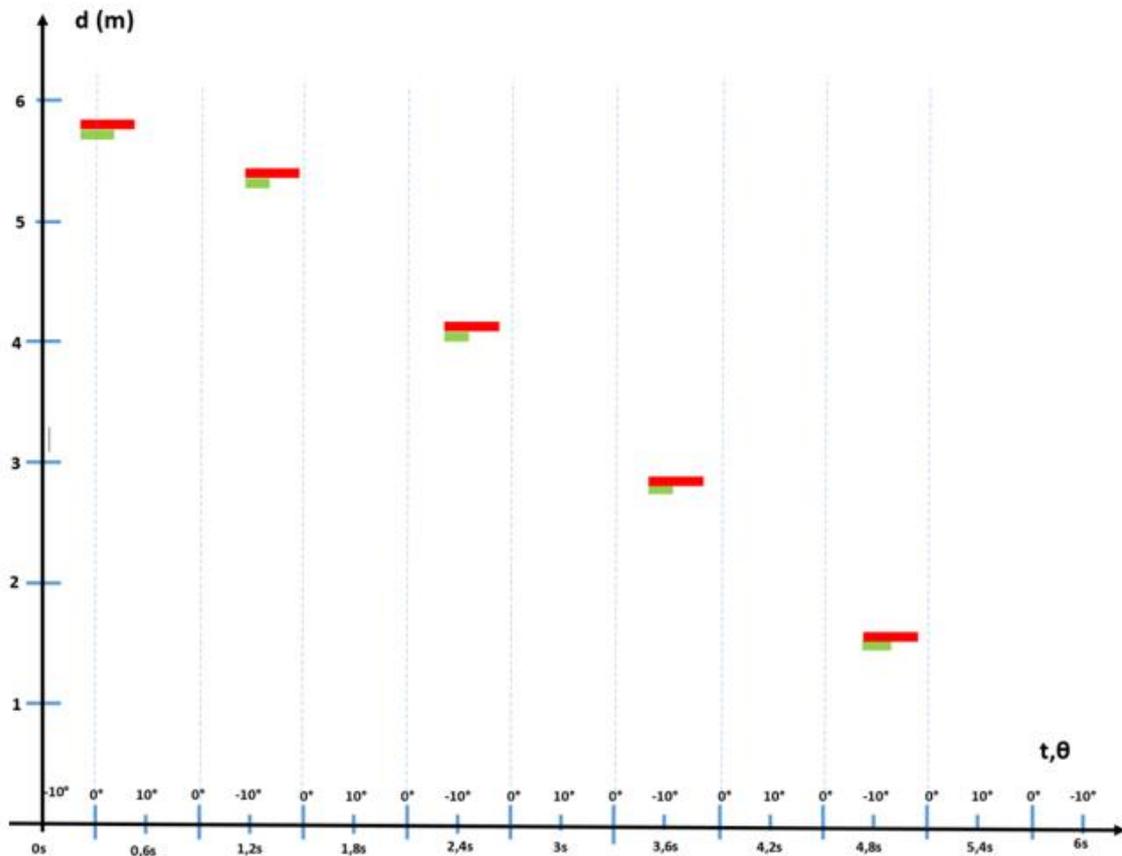


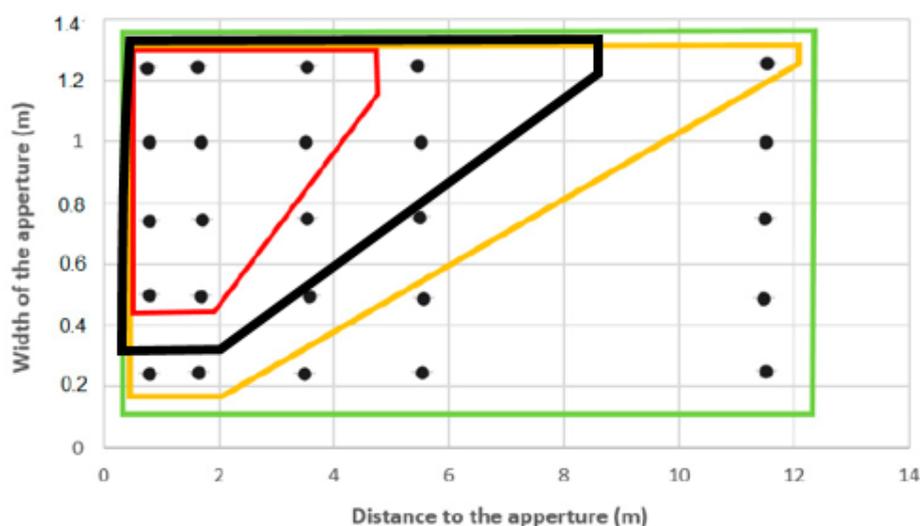
Figure 5.11 : Obstacle de face à six mètres dévié au bout de 0,5 seconde. On remarque, qu'après déviation, l'obstacle latéral est perçu deux fois moins souvent qu'un obstacle frontal, c'est-à-dire tous les deux pas, soit toutes les 1,2s, ou tous les 1,2m.

La perception d'un obstacle latéral est plus échantillonnée dans le temps que celle d'un obstacle central. Nous faisons l'hypothèse que ne pas oublier un objet latéral en mémoire spatiale demande plus d'efforts que pour un objet axial. Tous les objets deviennent latéraux dans le processus d'évitement. Pour une locomotion fonctionnelle et adaptée, il ne faut donc pas réguler l'action dans un mode uniquement écologique sur la base des stimulations haptiques instantanées de l'appareil pour faire un évitement. Construire une représentation spatiale de l'obstacle est nécessaire.

Cas n°4 : Avancée face à une ouverture dans un mur.

Nous allons reprendre les mêmes paramètres de marche que dans les cas 2 et 3. Notre vitesse angulaire de rotation est de 20° pour 0,6s soit 0,6 rad/s. Nous allons par interpolation dessiner la surface comprise entre 0,4 et 0,8 rad/s montrant les ouvertures détectées en noir. Pour évaluer l'ouverture détectée avec une portée de quatre mètres, on regarde à la distance de 3,7 m, distance à laquelle se trouve la personne une fois la vibration du mur perçue. De même pour la portée de six mètres on regardera l'ouverture détectée à 5,7m.

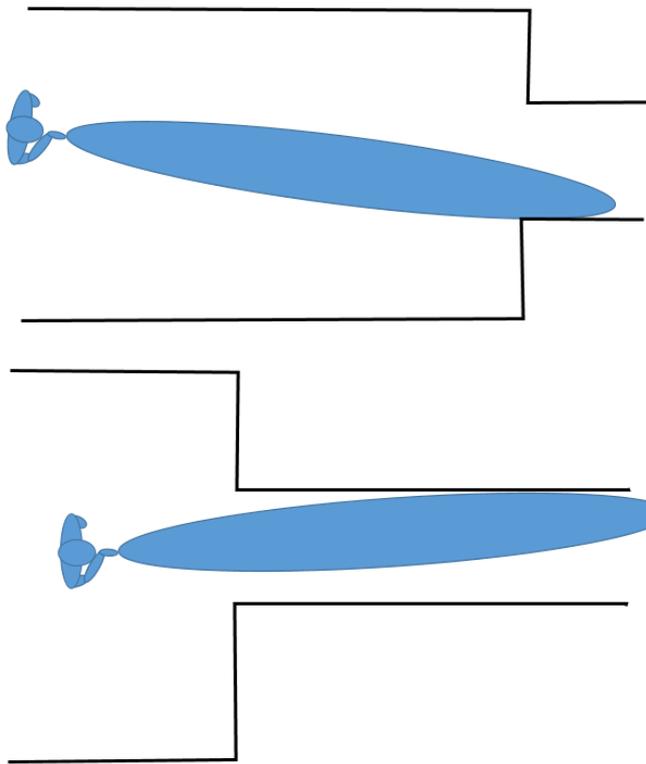
On voit sur la figure 5.12 qu'à quatre mètres de portée les ouvertures inférieures à 50 cm de large ne sont pas détectées et que pour six mètres de portée il faut une ouverture d'au moins 75 cm



de large pour la détecter. Cependant en ralentissant le mouvement on voit que les ouvertures détectables peuvent descendre à 25 cm.

Figure 5.12 (ci-contre): Le rectangle noir montre que à 0,6 rad/s à la portée de quatre mètres une ouverture doit faire 50 cm de large pour être détectée et 75cm de large pour une portée de six mètres.

Le faisceau infrarouge empêche la perception des ouvertures trop fines qui n'ont pas d'intérêt fonctionnel et simplifie la prise de décision dans le protocole de passabilité d'une ouverture. La largeur angulaire apparente de l'ouverture est toujours plus faible que celle réelle à cause de l'infrarouge. Les recommandations apprises en formation sont : si on trouve une absence de vibration en portée de six mètres on peut passer largement dans la direction en question, en quatre mètres de portée, c'est possible de passer de front en se centrant bien, et que si l'ouverture n'est détectée qu'en deux mètres de portée il faudra passer de biais. Nous faisons l'hypothèse que **la perception de l'affordance (qui dépend) de la largeur d'un passage (en relation avec la largeur de l'individu) grâce au capteur infrarouge est essentiellement écologique, et ne demande pas de manipuler mentalement des représentations spatiales (de l'ouverture et du corps)**. Par contre, parfaitement se centrer dans un passage dans le mouvement quand il est étroit demande un contrôle qui peut être soit sur mode écologique, soit sur mode cognitif. Cela dépend de la structure du passage.



Pour un rétrécissement de couloir, il suffit de prendre l'axe de la non vibration qui sera constamment signalé par les parois du couloir (fig 5.12 bis).

Figure 5.12 bis : Entrée dans un rétrécissement de couloir.

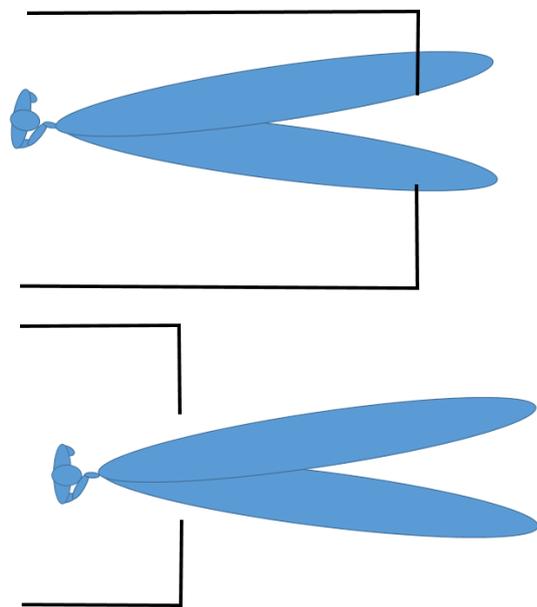


Figure 5.12 tris : centrage dans une ouverture de mur.

Par contre s'il s'agit de franchir une ouverture de mur cela est plus complexe, en effet plus on se rapproche de l'ouverture moins on peut percevoir son centre car l'espace derrière l'ouverture est dégagé (fig 5.12 tris). Le sujet proche ne percevra plus les bords de

l'ouverture dans l'amplitude de son balayage. Une représentation spatiale établie avec anticipation est nécessaire et c'est donc un processus cognitif.

Cas n°5 Evitement fluide d'un obstacle

Analysons la procédure d'évitement d'un obstacle. **Le comportement universel est de prendre le chemin le plus court ou du moindre effort (principe physique et physiologique).** Donc pour éviter un obstacle il est normal de rechercher la déviation minimale et la reprise souple de la trajectoire comme le fait un voyant. La première étape consiste donc à trouver le passage frôlant l'obstacle et à prendre cette direction, c'est l'action décrite ci-dessus dans le cas n°1, faite de manière dynamique, c'est-à-dire sans s'arrêter, ni casser le rythme de la marche. Cette première partie de l'action nécessite-t-elle une représentation de l'espace ? En première approche non, il suffit de trouver la direction où la vibration s'arrête et la prendre. En seconde approche oui, car on peut chercher le passage du côté droit ou du côté gauche, si on veut être fluide il faut prendre le meilleur côté du premier coup. Pour cela il faut avoir une représentation spatiale du lieu et de sa position dans le lieu. Par exemple, en navigation simple ou répétée, si on est près du mur ou de la bordure, il faut forcément rechercher une direction ramenant vers le centre du passage. Pour cela il faut avoir une représentation de sa position latérale dans l'allée. La seconde partie de l'action consiste à reprendre sa direction initiale une fois l'obstacle franchi. Cependant, plus on va arriver près de l'obstacle sur la trajectoire d'évitement, plus l'obstacle sera situé latéralement et perçu uniquement tous les deux pas (voir figure 5.11), l'obstacle sortira ensuite du champ de perception alors qu'il n'est pas encore franchi (figure 5.13 et 5.14). Si la personne n'a pas acquis la représentation spatiale de la position de l'objet, elle risque de se rabattre trop tôt et de se retrouver en frôlement ou collision avec l'obstacle. Il est conseillé en formation de prolonger un peu les trajectoires et de se rabattre doucement pour éviter les effets d'une représentation imprécise de la position de l'objet.

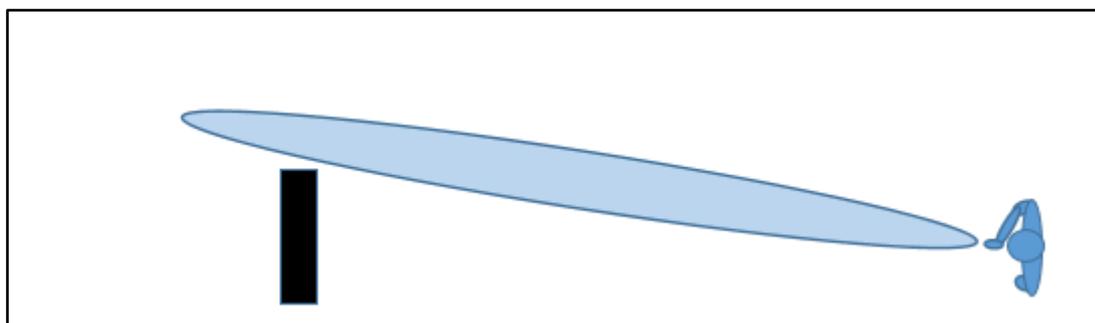


Figure 5.13 : Représentation de l'instant $t = 0$ de la localisation de la direction d'évitement.

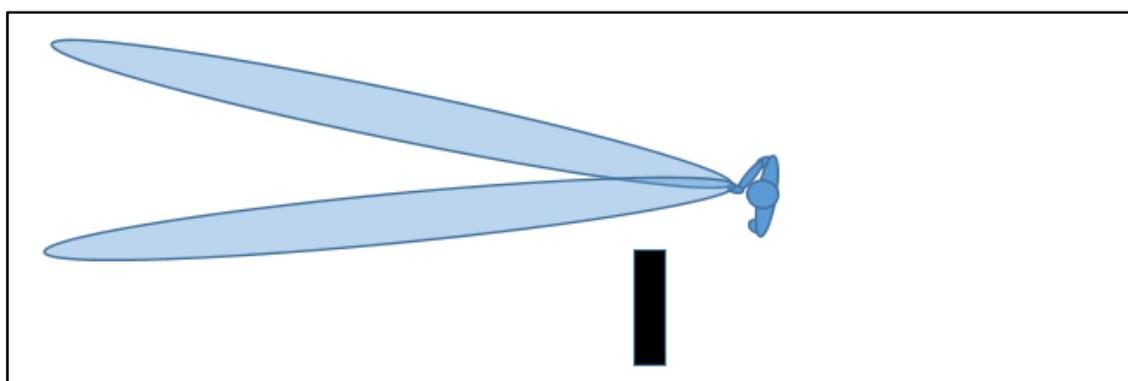


Figure 5.14 : sept ou huit pas après la représentation de la figure 12, l'obstacle n'est plus dans le champ de perception de l'utilisateur qui pourrait être tenté de se rabattre sur la gauche alors que l'obstacle n'est pas franchi. Ce comportement dû à une spatialisation insuffisante de l'obstacle, ou à un prolongement insuffisant de la trajectoire d'évitement (pouvant être motivée par la présence de nouveaux obstacles à droite, incitant à se rabattre à gauche) entraînera un frôlement ou une collision.

Pour avoir une bonne reprise de la trajectoire initiale, il faut soit se baser sur les repères sonores (direction de circulation des voitures), soit contrôler sa distance au mur avec le Tom Pouce III. En résumé, nous faisons l'hypothèse que **l'évitement d'un obstacle se fait à base d'une régulation écologique (au sens gibsonien) du mouvement locomoteur et de processus cognitifs : trouver la ou les directions d'évitement est écologique, choisir la direction est cognitif, retrouver sa trajectoire est cognitif**. Prolonger les trajectoires de deux pas dans l'évitement compense les risques de rabattement trop précoces. Remarquons que dans l'évitement l'objet a été perçu initialement de manière frontale (vis-à-vis du repère égocentré de l'individu) et donc peut être connu avec une bonne précision. Les objets les moins bien localisés sont ceux qui apparaissent latéraux et redeviennent frontaux quand on est déjà avancé dans la portée du TP3, ce qui indique un problème de régulation locomotrice de la trajectoire qui risque de finir en collision.

Cas n°6 Rôle de l'anticipation sur la régulation de l'évitement d'un obstacle

Lorsqu'il faut éviter un grand obstacle, l'anticipation joue un rôle crucial pour réguler la locomotion. Citons le contournement d'un passage qui s'avère trop étroit (situation observée dans le protocole de passabilité d'une ouverture lorsqu'il fallait contourner le mur). A titre d'exemple, comme illustré dans la Figure 5.15, comparons le comportement de deux participants, où le participant vert va plus anticiper la présence de l'obstacle, contrairement au participant bleu. Ce dernier persiste à avancer malgré un signal de vibration qui lui spécifie que l'obstacle est dans l'axe de son déplacement et qu'il devrait dévier sa trajectoire. **Le contrôle locomoteur correspond ici à une approche écologique où une information spécifie directement une action (Gibson & Gibson, 1955).** Une interprétation gibsonienne de ce comportement inadapté serait que le participant n'a pas encore bien appris à faire le lien entre la stimulation haptique et le comportement locomoteur. La conséquence est que le participant tarde à prendre sa décision d'évitement par manque d'anticipation. A contrario, le sujet en vert déclenche une déviation de sa trajectoire dès que la présence du mur est détectée, de façon à l'éviter.

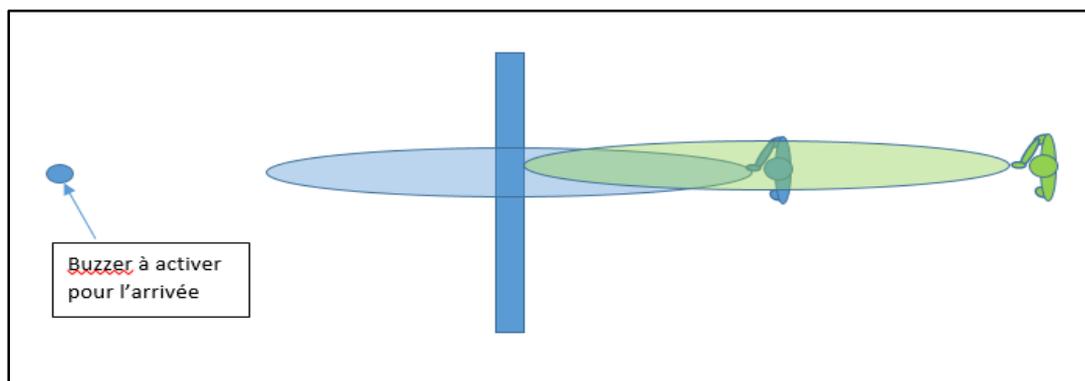


Figure 5.15. Illustration de la position initiale de deux participants au moment t=0 de la décision de contourner un mur.

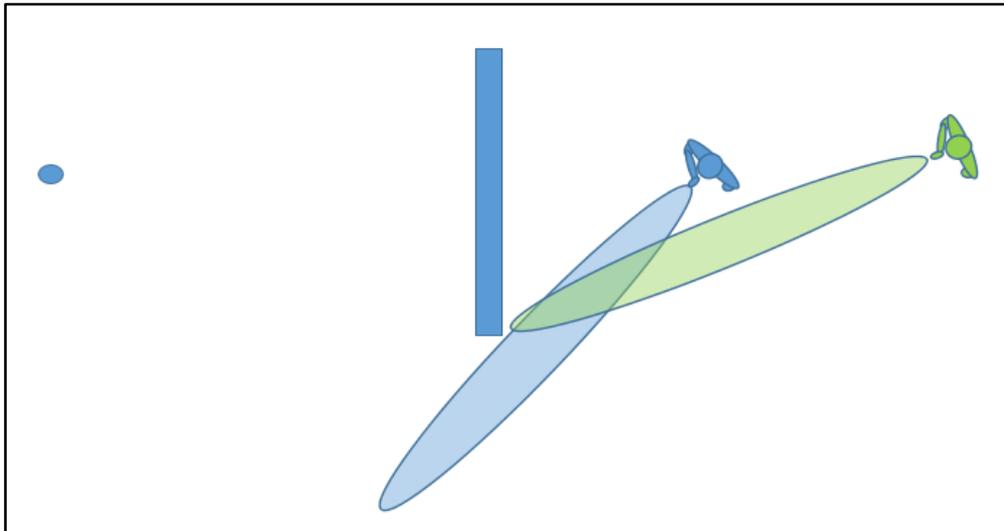


Figure 5.16 : Positions et orientations du sujet bleu et du sujet vert au moment de l'initiation du contournement.

A l'instant suivant (par rapport à la Figure 14), le sujet bleu prend la direction d'évitement voir (figure 5.16), mais comme la vibration était déjà présente et qu'il n'a plus accès à l'apparition de la vibration (comme il est trop près), il n'a pas moyen de connaître la distance du bord du mur de manière précise. En effet, **l'apparition de la vibration spécifique (au sens écologique) la distance de l'individu à l'obstacle.** Le sujet vert, quant à lui, doit avancer un peu tout en explorant un côté du mur avec la canne. Ce faisant, il va perdre le signal de vibration par moments (car on est à la limite de portée du faisceau optique), jusqu'à le retrouver une fois détecté l'extrémité du mur. A cet instant précis, **le participant vert a une information quant à la distance (car il connaît la portée du faisceau qu'il a choisie entre quatre, ou six mètres ; cette information est d'origine cognitive car elle dépend du choix de la portée) et direction de l'extrémité du mur ;** contrairement au sujet bleu qui n'a qu'une information de direction. En effet, contrairement au sujet bleu, le sujet vert a pu se construire **une représentation spatiale de l'emplacement de l'extrémité du mur,** représentation qu'il va pouvoir mettre à jour au cours de son déplacement, **par mise à jour des informations spatiales** ("spatial updating" de Rieser et al., 1995; Rieser et al, 1990; Loomis et al., 2002). Une conclusion provisoire serait que le TP3 permet de créer des références spatiales en direction et en distance, sous réserve que l'utilisateur tienne compte de la portée de l'appareil et mette en œuvre les processus de "spatial updating". Le comportement optimal du sujet vert reflète une **régulation anticipée du contournement de l'obstacle,** alors que le sujet bleu va déclencher un contournement tardif.

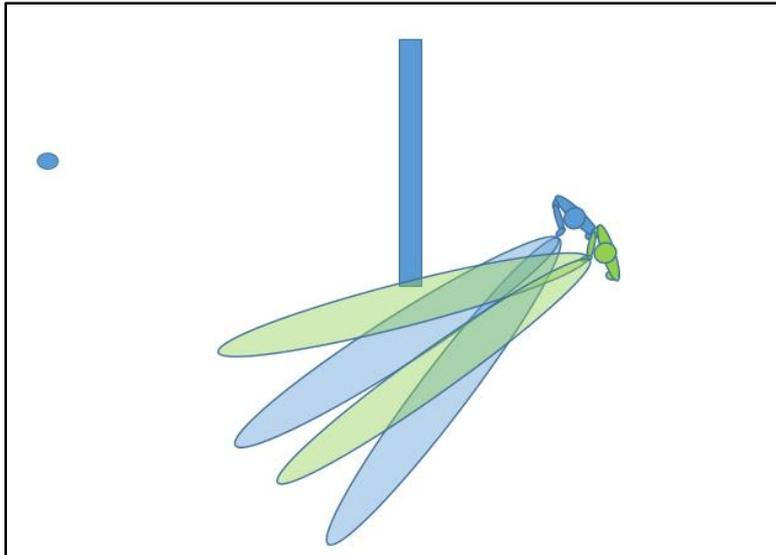


Figure 5.17 : Illustration de la zone de balayage de chaque participant à l’approche du mur. Quand le mur n’est plus dans la zone de balayage, il se retrouve dans la “zone aveugle” car les faisceaux de TP3 ne détectent plus le mur et n’entraînent plus de signal de vibration.

A l’approche du mur (cf. figure 5.17), en fonction de l’orientation du participant vis-à-vis du mur, ce dernier va entrer en “zone aveugle” (le mur n’est plus détecté par le TP3) plus ou moins tardivement. Dans les cas illustrés ici, le sujet vert entre plus tardivement en zone aveugle que le sujet bleu. Si on rentre plus précocement en zone aveugle, et qu’en plus on n’a pas eu la possibilité (cas du sujet bleu) de se construire une représentation spatiale de l’extrémité du mur, il est fort probable de redresser trop tôt sa trajectoire et donc de rentrer en contact avec le mur. En conséquence, une **régulation anticipée du contournement de l’obstacle permet d’avoir une action de contournement plus adaptée/fonctionnelle.**

Toutefois, le rôle de l’anticipation sur la régulation de l’évitement d’un obstacle dépend de la distance et dimension de l’obstacle. Ainsi faire des évitements avec la portée de six mètres est préférable à la portée de quatre mètres car cela donne plus d’anticipation, ce qui permet de réduire les déviations. On pourrait croire qu’il y a un compromis entre la réduction des déviations permises par les plus grandes portées et la moins bonne connaissance des distances aux obstacles (voir §V.2 cas n°2). Cependant l’anticipation longue est importante pour les obstacles larges, et pour les obstacles larges il n’y a pas de problèmes de pertes de précision de portée avec les grandes distances. C’est pour les obstacles fins et surtout latéraux que la portée introduit de l’incertitude sur la distance, cependant ces obstacles ne nécessitent pas de déviations importantes et donc peuvent être gérés avec une portée plus courte. C’est aussi pour cette raison que globalement on tend par logiciel dans l’appareil à gommer les obstacles fins entre quatre et six mètres.

Retenons que dans le cas d’un évitement tardif, une bonne représentation spatiale et kinesthésie ne peuvent pas compenser la zone aveugle de l’appareil près de l’obstacle, car on n’a pas l’information initiale de la distance. Le frôlement ou la collision seront alors très probables.

Est-ce que l’effort cognitif est plus important chez le non-voyant pour réguler sa locomotion avec le TP3 qu’avec le chien guide ou la canne simple ? Pour ce qui concerne la gestion cognitive

de la cartographie du trajet, c'est la même chose pour les trois modalités. **Concernant l'évitement des obstacles, le TP3 joue le rôle du chien. Mais l'utilisateur doit assurer la prise en charge cognitive de l'outil**, fournissant une perception écologique pour certaines actions et demandant de la représentation spatiale pour une majorité de processus.

La canne simple fournit de la perception aussi écologique et cognitive, mais moins complexe que celle du TP3 car elle fait appel à une représentation spatiale à plus courte distance. Cela explique que certains non-voyants préfèrent la canne blanche. L'évitement des obstacles par le TP3 à une contrepartie cognitive non négligeable. On peut se poser la question de la contrepartie de l'évitement d'obstacle par rapport à celle de la charge cognitive nécessaire. Les arguments suivants ont été évoqués par les utilisateurs fidèles et ceux qui ont abandonné.

- Arguments pour le TP3 :
 - La personne ne supporte pas la collision qui lui renvoie psychologiquement le handicap.
 - La personne aime la discrétion et ne pas perturber les passants.
 - La charge cognitive pour certains n'est pas très importante une fois les automatismes acquis ce qui prend typiquement de deux à six mois.
 - La personne n'aime pas être surprise et ne pas pouvoir anticiper ce qu'il va se passer.
- Arguments contre le TP3
 - La personne ne fait confiance qu'au contact mécanique.
 - La charge cognitive est pour elle très lourde et ne s'automatise pas avec le temps.
 - Toucher avec la canne est normal et naturel et donne plus d'information sur l'obstacle.
 - Il faut s'occuper d'un matériel plus délicat que la canne.

V.3. Interprétation des observations incluant l'ensemble des protocoles

V.3.1 Interprétation conjointe des protocoles

Dans l'introduction générale nous avons posé trois questions simples qui sont les suivantes :

- La trajectoire prise par un déficient visuel muni d'une canne électronique est- elle différente de celle prise par un utilisateur de la canne blanche simple ?
- Quelles sont les spécificités de ces trajectoires ?
- Sont-elles comparables aux trajectoires réalisées par des sujets voyants ?

Synthétisons les réponses des protocoles à ces questions. Hormis le protocole de pointage locomoteur, tous les protocoles ont mis en jeu une trajectoire. Pour la navigation répétée elle a été uniquement faite à la canne électronique et nous n'avons pas de relevés de comparaison. **Nous allons donc commenter les trois protocoles mettant en jeu les trajectoires et les trois modalités.**

Pour le « choix de passage » la destination finale est la même pour les trois modalités, c'est -à -dire que le bon passage est finalement pris. A la canne électronique la trajectoire est sans contact et a un aspect similaire à celle de la vue. A la canne simple le bon passage est trouvé à base de contacts de la canne avec les obstacles et la trajectoire est très différente de celle des voyants même si le bon passage est finalement pris (avec un taux de succès quelque peu inférieur). Le temps d'analyse préalable nécessaire au TP3 pour préparer la trajectoire est égal au temps mis par la canne pour le trouver à base de contact avec les obstacles, le TP3 ne permet pas de gain de temps au final.

Pour la « passabilité d'une ouverture », le choix de passer ou contourner selon la largeur de l'obstacle a été le même pour les trois modalités. Pour la canne simple ce choix s'est fait au contact de l'ouverture avec la canne, pour la canne électronique ce choix s'est fait à plusieurs mètres de distance comme pour la vue avec une trajectoire voisine de celle des voyants. Ce choix s'est fait dans la fluidité du mouvement au TP3 contrairement au choix de passage, il n'y a pas eu de temps d'arrêt pour analyser. Donc le fait de contourner avec anticipation permet de gagner du temps car le trajet est plus court que celui de la canne simple et qu'il n'y a pas le temps d'arrêt pour évaluer à la canne la largeur de l'ouverture.

Pour la « navigation simple au milieu de nombreux obstacles », les obstacles n'étaient pas évités mieux que par le hasard pour la canne simple, alors que la probabilité d'avoir le score moyen obtenu au TP3 était de l'ordre de 10^{-5} pour un sujet, soit de $(10^{-5})^{12} = 10^{-60}$ pour 12 sujets de suite. Cela suggère que la trajectoire était différente de celle avec la canne simple et que l'efficacité de l'évitement n'est pas discutable. Concernant la comparaison aux voyants, seuls les sujets non-voyants les plus fluides ont une trajectoire équivalente, y compris à vitesse soutenue. Par contre la fiabilité des voyants reste largement supérieure en termes d'absence totale de collision et de vitesse limite pouvant être atteinte.

Ces protocoles sont différents, mais tous, à l'exception du pointage locomoteur, confrontent le sujet à des obstacles lui demandant un ajustement de trajectoire.

Le calcul du % d'obstacles franchis **avec contacts** à la canne électronique dans trois situations différentes à savoir :

- Le contournement du mur dans le protocole de passabilité : 52%, écart type 31%
- Le centrage dans l'ouverture dans le protocole de passabilité : 29,9% écart type 21,5%
- L'évitement des obstacles dans la navigation répétée : 9,3%, écart type 6,1%

Ces résultats montrent plusieurs choses : les écarts types sont très importants pour les deux premières situations, la variabilité des sujets est grande. Ces relevés expérimentaux classent clairement ces trois actions par ordre de difficulté. Quelle est la différence entre le contournement de mur et l'évitement d'obstacles dans la navigation répétée? C'est la déviation

demandée pour l'évitement. En effet on a vu au cas n°6 du §V.2 qu'un obstacle large n'était gérable par le TP3 que si on l'évite de loin avec l'anticipation maximale possible liée à la portée de l'appareil. Tous les utilisateurs ont appris cela pendant leur formation. **Les sujets qui se sont focalisés sur l'ouverture se trouvant dans l'axe et qui ont tardé à prendre leur décision sur le fait de passer ou contourner l'obstacle se sont trouvés piégés en se rapprochant trop près du mur, sans avoir conscience de sa largeur. Les sujets qui ont analysé l'ouverture de loin (en extrémité de portée) et ont dévié de suite s'en sont mieux sortis car ils avaient les informations spatiales leur permettant de localiser l'extrémité du mur.** Ce résultat a été confirmé par l'analyse statistique (figure 4.38). Pour le centrage dans le passage, on a vu au cas n°4 du §5.2 que le passage de mur, qui n'est pas suivi d'un couloir, ne permettait pas d'être guidé de manière écologique dans le rétrécissement. On est sur une tâche de précision **demandant une représentation spatiale précise faite plusieurs mètres à l'avance.** C'est ce qui explique le moins bon score.

Pour la question des différences entre non-voyants de naissance ou tardifs très largement débattue dans la littérature paragraphe II.1.4.2 (Thinus-Blanc et Gaunet, 1997; Barber et Lederman, 1988; Hollins et Kelley, 1988; Rieser et al., 1982; Loomis et al., 1993), nous n'avons pas effectué un recrutement dans le but de répondre à cette question, la plupart des sujets étaient mal voyants ou très mal voyants de naissance et ont perdu totalement la vue au bout de quelques années. Il y a que trois sujets ayant déclaré n'avoir jamais eu aucune forme de vision, ce qui est trop faible pour faire une analyse. Comme nous l'avons discuté au moment de l'état de l'art, il sera très difficile de comprendre l'effet d'une expérience visuelle car il est modulé par le vécu locomoteur. De plus, l'expérience visuelle pour un mal voyant ou très malvoyant de naissance est très difficile à quantifier, et il en est de même pour le vécu locomoteur. Maintenant si nous devons contribuer au débat sur l'importance du passé visuel dans la représentation spatiale du non-voyant, nous aurions retenu le cas de la petite Kelli (Landau, Gleitman and Spelke 1984; Loomis, 1993), et nous aurions rajouté que deux des quatre utilisateurs dans le groupe qui s'est distingué par des performances supérieures aux autres (classe 2 fig. 4.39) n'ont pas de passé visuel. Alors qu'il n'y avait que trois personnes sur 13 sans passé visuel, et que l'usage du TP3 demande une bonne aptitude à la représentation spatiale.

Comparaison avec les protocoles décrits dans l'état de l'art

Le protocole de "navigation simple au milieu de nombreux obstacles" (section IV.2.2) a des points communs avec ceux de Dos Santos et al., (2020); Jeong & Yu, (2016); Kim & Cho, (2013); O'Brien et al., (2014) décrits dans l'état de l'art. On retrouve des obstacles disposés sur des longueurs d'une vingtaine de mètres et une largeur de circulation variant entre deux et trois mètres. On constate une vitesse locomotrice relatée dans ces articles qui varie entre 0.2 et 0.4 m/s alors que la vitesse moyenne des non-voyants était de l'ordre de de 0,9 m/s dans nos protocoles. Maintenant ces trois publications ne décrivent pas de manière suffisamment précise leur répartition d'obstacles (a priori moins encombrée que la nôtre) ce qui ne permet pas de calculer la probabilité de passer sans contact au hasard (Dernayka et al., 2021) ce qui est le seul moyen que nous avons trouvé pour décrire objectivement la difficulté d'un trajet d'évitement d'obstacles. Une seule publication sur les trois (Jeong et Yu, 2016) a trouvé un bon taux

d'évitement du même ordre de grandeur que le nôtre (90%) mais à une vitesse locomotrice de 0,3m/s avec seulement cinq obstacles plus étroits (30-70 cm au lieu de 60-120 cm) laissant plus d'espace libre. Les deux autres publications n'ont pas trouvé de différence du taux d'évitement entre canne simple et électronique dépassant 18% à 0,3m/s alors que nous avons une différence de taux de contacts avec l'obstacle qui va de 52% à la canne blanche dans le protocole de navigation simple (qui correspond approximativement à un taux de collisions pour une trajectoire au hasard) à 9,2% à la canne électronique.

La différence fondamentale avec les autres études était que nous avons des utilisateurs expérimentés depuis plusieurs années au quotidien, contrairement à des sujets naïfs testant un prototype.

V.3.2. Interprétation de l'ACP

L'ACP suggère que la qualité du pointage locomoteur en direction est liée au choix de passage juste et au taux d'évitement en endurance. Pour le lien avec le choix du passage juste, c'est la seule autre action parmi les protocoles qui se fait également à l'arrêt. Le faisceau est balayé afin de discerner les trois largeurs différentes d'obstacles. Ce balayage est forcément lent (ce qui explique en partie le temps élevé mis par les utilisateurs pour faire cette analyse), en effet comme la durée minimale d'une vibration est de 0,3s, si on balaie très vite, les trois obstacles peuvent apparaître avec une largeur temporelle de 300ms, alors que l'un est trois fois plus large que l'autre. Il faut donc balayer le faisceau lentement. On peut comprendre qu'un pointage précis quand on a du temps pour le faire soit lié à la perception précise d'une largeur angulaire faite sans limitation de durée. Le lien avec le faible nombre de collisions à la navigation répétée est plus difficile à faire. La navigation répétée est une épreuve d'endurance, même si les 20 minutes de marche dans des conditions d'encombrement modéré n'ont pas généré de fatigue physique chez ces sujets tous en bonne santé, les frôlements d'obstacles sont arrivés dans des périodes ponctuelles de déconcentration. Peut-être qu'un bon pointage locomoteur en direction permet d'éviter les obstacles avec moins de concentration et donc moins de fatigue cognitive ? Il faudrait probablement traiter sujet par sujet les causes de la performance ou contre-performance au pointage locomoteur (défaut de tenue de verticalité de l'appareil, de ligne droite ou de prise de direction) pour essayer d'approfondir ce lien potentiel statistique, d'autant plus **que nous n'avons pas mis en évidence la fatigue cognitive dans la navigation répétée.**

Il apparaît cependant qu'un bon pointage locomoteur en direction à l'arrêt n'est pas une condition garantissant une bonne capacité d'évitement tel que le montre l'ACP. En effet le pointage locomoteur se concentre sur la perception d'une direction avec du temps de disponible (supérieur à la seconde) tandis que le processus d'évitement demande plusieurs actions :

- Analyse de la direction dans le mouvement sans arrêter le balayage de la canne.

- Bonne localisation de l'obstacle en dynamique (nous avons vu aux cas deux et trois du paragraphe précédent que la représentation des distances peut être assez précise dans le mouvement), cela demande une action cognitive de représentation spatiale pour anticiper l'obstacle à la bonne distance, ne pas passer trop loin car les passages restent étroits dans tous les protocoles et se rabattre ni trop tôt (pour ne pas collisionner l'obstacle), ni trop tard au risque de perdre sa direction de marche.

Peut-on éviter un obstacle avec le TP3 sans représentation spatiale ? Cela semble très difficile, du moins de le faire de manière fluide. En effet on peut trouver la direction de passage avec la marge nécessaire de sécurité (cas n°1 du paragraphe précédent grâce au faisceau infrarouge) **de façon écologique** en cherchant juste la direction de l'absence de vibration. Par contre plus on va arriver près de l'obstacle sur la trajectoire d'évitement, moins on va pouvoir percevoir la position latérale de l'obstacle, qui n'est perçue comme on l'a vu à la figure 5.11 que tous les deux pas, plus une sortie éventuelle du champ d'exploration des faisceaux (figure 5.14).

La première composante de l'ACP fait le lien entre deux variables : l'absence de collision en contournant le mur (Aff_cont_nocoll) et la distance à laquelle la décision de contournement du mur a été prise (Aff_dist_decision). Ce lien découle directement du cas n°6, et on a vu qu'il y avait deux effets cumulés pour expliquer les conséquences d'une déviation tardive : l'absence de possibilité y compris par représentation spatiale et kinesthésie de connaître la position de l'extrémité du mur, la longueur de la zone aveugle de l'outil à cause de la déviation importante de la trajectoire. Au dépouillement des résultats nous avons été très surpris que le sujet qui avait fait les plus belles trajectoires dans le slalom, et avait semblé le plus infaillible, avait étonnamment souvent frôlé en contournant le mur dans l'expérience de passabilité. C'est d'ailleurs cela qui nous a amené à relever cette donnée non prévue initialement dans l'analyse du protocole. Cela s'est finalement expliqué par ses décisions tardives de contournement, la qualité de sa représentation spatiale montrée dans les autres protocoles ne pouvant pas compenser ce retard d'anticipation.

La troisième composante mise en évidence par l'ACP associe :

- Le barème du slalom incluant une moitié des points consacrée à l'habilité à éviter les obstacles et l'autre moitié à la vitesse d'exécution (Slalom_Bar_10).
- La vitesse de réalisation du parcours d'endurance (Edur_bar_vit).
- L'absence de frôlements en franchissant l'ouverture dans le protocole de passabilité (Aff_nofrol).

Il y a en fait deux éléments dans ces trois barèmes : une vigueur du mouvement (Labaune et al., 2020; Reppert et al., 2018) se traduisant par une vitesse d'exécution d'une part et d'autre part une vigueur qui ne se fait pas au détriment de la précision, puisqu'il le taux de non frôlement est bon.

Deux des composantes de l'ACP (anticipation et vigueur du mouvement) s'interprètent de manière simple et directe. La composante perceptive égocentrée de l'espace a une interprétation moins solide.

V.3.3. Schéma de synthèse

Nous allons résumer sur un schéma synthétique (cf. figure 5.18) l'ensemble des informations issues de la discussion. Le schéma décrit les processus cognitifs et écologiques mis en jeu dans les déplacements, ainsi que les causes humaines ou matérielles des défaillances.

Les stratégies ayant montré leur efficacité sont : une anticipation des larges obstacles dès leur identification, la création d'une représentation spatiale dès l'identification de l'obstacle ou du passage, la mise à jour de cette représentation spatiale pendant une durée suffisante pour franchir l'obstacle ou prendre le passage. Il est clair que tous ces processus, dont beaucoup sont exigeants sur le plan cognitif, même si la fatigue engendrée se réduit avec l'expérience, ne sont mis en œuvre totalement ou partiellement que fonction de la difficulté que représente une situation particulière de déambulation pour le sujet.

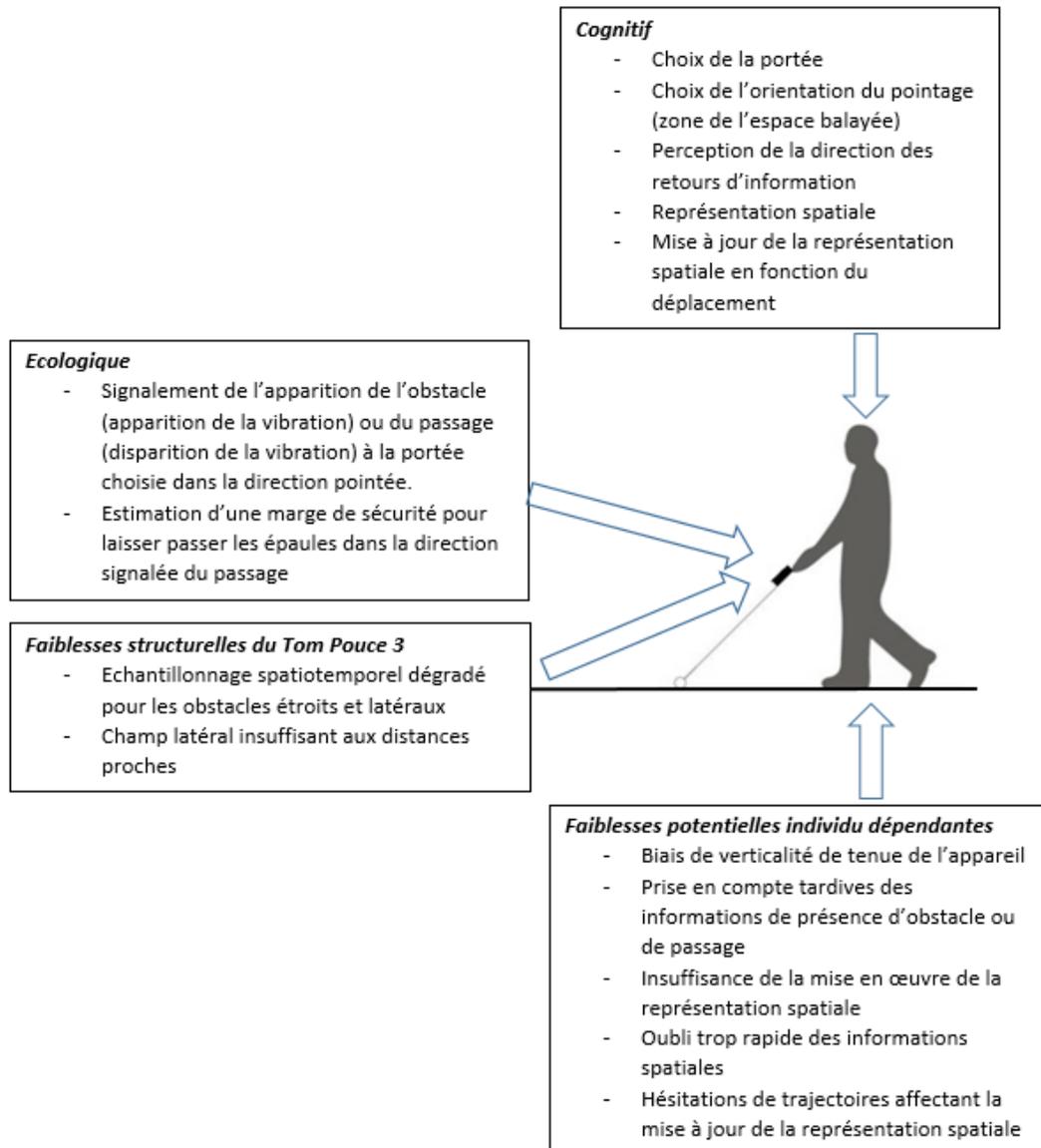


Figure 5.18 : Schéma de synthèse sur les processus mis en jeu dans la locomotion régulée par le Tom Pouce III.

V.4. Conclusion : limites et perspectives

L'équipe du Laboratoire Aimé Cotton (LAC) avait tenté en 2005, avec Richard Legras, une approche d'évaluation de l'apport des cannes électroniques de l'époque directement en environnement réel (Damaschini, et al, 2005). Même si des résultats globaux d'amélioration de la locomotion avec les cannes électroniques avaient été observés, le nombre très important de paramètres pouvant influencé les résultats rendait l'analyse des causes difficile. De plus l'environnement urbain réel n'étant pas totalement maîtrisé, les conditions expérimentales pouvaient varier d'un sujet à l'autre. L'absence de travaux dans la littérature sur des utilisateurs non-voyants expérimentés d'outils de substitution sensorielle fonctionnels dans les déplacements n'a pas facilité la tâche. Ceci reste cependant la seule étude en situation réelle.

Nous avons entamé ici un travail exploratoire prenant le problème sous l'autre face à base d'exercices en milieu contrôlé dont les paramètres et la reproductibilité sont maîtrisés. Maintenant ce travail a eu des apports et aussi de nombreuses limites que nous allons essayer de répertorier.

Pour les apports :

- Les travaux effectués permettent de proposer des tests simples à mettre en œuvre facilement reproductibles par d'autres équipes dans des conditions similaires, pour pouvoir évaluer une aide technique à la locomotion quelle que soit sa nature technologique, dans des actions ayant un lien avec la vie quotidienne. Cela sera très utile pour tester efficacement les évolutions de l'outil actuel.
- Deux de nos cinq protocoles se sont avérés plus productifs que les autres : la navigation simple (slalom) et la passabilité d'une ouverture. En effet, ce sont des situations ponctuelles qui arrivent dans la vie courante sous cette forme, même si elles sont accompagnées d'un autre contexte sonore (circulation) et d'une orientation globale à gérer. Ils ont permis de faire des analyses sur le comportement moteur de la personne, et sur la représentation spatiale nécessaire pour compenser les informations non fournies par l'outil. Ils ont permis également de montrer là où l'outil peut s'améliorer en fournissant un flux plus « écologique » d'informations à l'utilisateur.
- Une mise à plat des rôles respectifs de l'outil et de l'utilisateur, de ce que l'outil permet de faire «écologiquement», de ce que l'utilisateur peut ou ne peut pas faire en fonction de sa facilité à avoir une bonne profondeur mémoire dans sa représentation spatiale temporaire.
- Démonstration que la canne électronique peut apporter des informations utiles au déplacement non accessibles à l'écholocation (Cotzin & Dallenbach, 1950; Kellogg, 1962; Rice & Feinstein, 1965; Strelow, 1985, p.233; Strelow, 1982).

Pour les limites :

- Nous ne sommes pas dans des conditions quotidiennes de locomotion : pas de trajet à gérer (prendre la première route à droite, puis la seconde à gauche, ce qui implique par exemple une traversée à planifier, etc.). Pas de circulation automobile à analyser, ni le stress de ne pas se retrouver intempestivement sur la route, pas de passants au comportement aléatoire à gérer, pas de chemins défoncés par les travaux à interpréter, pas de bruits pouvant déconcentrer ou inquiéter (abolement de chien proche, chute d'objet, etc), pas d'informations contradictoires (Pick, Warren, 1969), les utilisateurs peuvent plus se concentrer sur les informations de l'appareil que dans la réalité. Il sera probablement utile de penser à des manipulations complémentaires inspirées de celles de Richard Legras (Damaschini et al, 2005).
- Le protocole endurance ou de navigation répétée paraît trop restrictif pour pouvoir représenter l'aspect évitement réel, dans la durée il y a forcément un trajet à gérer, ici de simples aller-retours ne demandent pas de gestion du trajet global.
- Le test de choix de passage peut être biaisé par des confusions entre la droite et la gauche ou bien entre « passer à droite d'un obstacle » ou « le laisser sur sa droite ». Dans la réalité un choix de passage est une opération très multi-sensorielle faisant appel à la

représentation spatiale du trajet global, une analyse auditive globale de l'environnement (flux de passant, flux de la circulation automobile, présence ou non d'un mur, repère ponctuel au sol ou obstacle spécifique analysé par la canne électronique). Le test n'a porté que sur l'identification d'obstacles spécifiques dans un contexte non réaliste, car dans la vie courante on ne va pas s'arrêter 30 secondes pour choisir un passage, si un obstacle spécifique vu au TP3 sert à une décision, il faut qu'il soit analysable dans le flux de la marche ou sur un arrêt très bref.

- Le pointage locomoteur a le défaut d'avoir été fait en statique, alors que la réalité est dynamique et que les processus dynamiques comme on l'a vu par exemple sur la perception des distances ou la prise de conscience d'une direction ne se font pas avec les mêmes processus, ni la même résolution en statique et en dynamique.
- Nos analyses statistiques ont comparé un groupe de déficients visuels avec la canne simple et le TP3, on peut émettre la critique que la canne simple n'est plus leur outil quotidien actuel, même s'ils l'ont tous utilisé de nombreuses années avant, et que donc ils ne l'utilisent plus de manière optimale, ont perdu leur sens des masses, etc. C'est d'ailleurs la critique principale des non-voyants « anti canne électronique » pour remettre en cause ces études. Pour répondre à cette critique il y a une bonne et une mauvaise solution, la mauvaise serait de prendre un groupe d'utilisateurs à la canne seule et de le comparer à un groupe d'utilisateurs à la canne électronique. La critique serait alors que la variabilité très importante dans les capacités en locomotion des sujets peut totalement fausser les résultats, et que les sujets à la canne électronique ont eu pu accéder à plus de rééducation et que les résultats viennent de leur rééducation et expérience plus importante. L'autre façon est de comparer à la canne simple un groupe d'utilisateur de canne électronique qui va abandonner pour les tests son outil quotidien, avec un groupe d'utilisateurs au quotidien de la canne simple. Si les groupes sont comparables, ou si les résultats du groupe de canne électronique sont meilleurs, on ne pourra pas dire que les utilisateurs de canne électronique ne savent plus utiliser une canne simple. La difficulté d'une telle étude sera de recruter des sujets pour les tests en canne simple. Une solution pourrait être de proposer à ceux voulant entrer en formation canne électronique en région parisienne, le jour de leur évaluation de venir à Orsay faire les tests en canne simple.
- Nous pouvons regretter de ne pas avoir utilisé de mesure objective (capture de mouvement, etc) de la fluidité locomotrice. Nous avons vu des différences sur les vidéos, mais il semble compliqué de les quantifier à faible niveau d'instrumentation (qui est une contrainte que l'on s'est imposé pour avoir des expériences facilement reproductibles et simples à mettre en œuvre). Ceci ne nous a pas permis d'intégrer ce paramètre dans les études. Ce point avait été traité en 2005 par l'équipe du LAC sur la base d'une échelle subjective (Damaschini et al, 2005) qu'il pourrait être utile de reprendre pour poursuivre l'analyse de nos données.

Pour les perspectives :

Introduire des éléments maîtrisés rapprochant de la réalité, il faut continuer à aller vers des choses plus proches des conditions réelles de la locomotion tout en maintenant l'aspect maîtrisé des protocoles, la facilité à les reproduire dans n'importe quel lieu. La composante «

techniquement accessible » dans le cadre de protocoles maîtrisés et qui manque le plus pour aller vers la locomotion réelle est la notion de trajet à gérer simultanée aux opérations d'évitement. En effet, dans un trajet réel se cumulent deux aspects de la construction spatiale comme on l'a évoqué dans l'introduction du paragraphe, celle qui gère le trajet à grande échelle et qui doit être pérenne dans le temps et celle fugitive qui permet de gérer les aléas variables (obstacles). Nos protocoles, ne faisant pas intervenir la première, laissent à priori plus de disponibilités cognitives pour la seconde. C'est en améliorant le protocole de navigation répétée que l'on pourra aller dans cette voie. Par exemple avec un trajet à plusieurs branches et des instructions de prendre les branches dans un certain ordre. Il sera intéressant par ailleurs d'analyser si le fait de devoir gérer la globalité d'un trajet impacte la gestion des obstacles.

Pour la navigation simple, il sera intéressant d'avoir une plus grande diversité de structure d'obstacles et de densité d'encombrement. La répartition des obstacles sur le trajet était assez homogène, ce qui permettait une traversée à vitesse sensiblement constante. Il serait intéressant de mélanger d'une part des obstacles de structures très différentes : poteaux noirs fins et blouses sur valet, avoir des zones dégagées où on peut accélérer et des zones fortement encombrées nécessitant un ralentissement important.

Pour la passabilité de l'ouverture, y intégrer deux murs successifs permettrait d'introduire des arrivées de biais sur les ouvertures quand on doit contourner le premier mur et passer le second par exemple. Il faut aussi rendre ce protocole plus ludique.

Pour le pointage locomoteur, le principe reste très intéressant sur le fond mais il faut qu'il se fasse en dynamique. En effet nous avons fait une hypothèse dans les interprétations, c'est qu'une fois l'obstacle détecté à la portée maximale choisie, c'est la kinesthésie associée à la représentation spatiale (pour la mise à jour des informations spatiales qui accompagnent le mouvement) qui prenait le relais pour actualiser la distance. Il serait intéressant d'avoir une preuve directe de cette hypothèse et de mesurer la précision de la mise à jour spatiale. On pourrait envisager l'expérience suivante : le début du trajet est canalisé par deux barres comme dans l'expérience de passabilité afin que la personne parte dans la direction souhaitée, un poteau se trouve dans son champ de balayage. Une ligne est tracée au sol à une certaine distance de l'obstacle (largement inférieure à la portée utilisée afin que l'on soit en situation de réactualisation de la distance par « spatial updating »), au franchissement de la ligne l'opérateur éteint l'appareil à l'aide d'une télécommande et demande simultanément au sujet de s'arrêter. Le poteau est retiré rapidement par un second opérateur et on demande au sujet de se placer à la position du poteau. L'expérience serait à faire également avec un obstacle large **car on a vu que le balayage diminuait la précision de la perception des distances pour les obstacles fins.**

Extension des protocoles pour évaluer un nouvel appareil, à court terme les améliorations de ces protocoles, et leur extension à des variantes avec obstacles au sol (dénivelés et plots de faible hauteur que l'appareil actuel ne détecte pas, rôle restant dédié à la canne) et en hauteur de type ronce isolée (posant problème à l'appareil actuel contrairement aux feuillages qui sont bien gérés) vont être utilisés pour évaluer les premiers prototypes de la quatrième génération d'appareils.

Analyses individuelles, il y aura encore des enseignements à tirer des expériences, notamment en faisant des analyses individuelles, afin de comprendre pour chaque personne le pourquoi de ses performances ou contre-performances dans un protocole particulier.

Que pouvons-nous améliorer à court ou moyen terme pour la locomotion des déficients visuels à la canne électronique ?

Concernant les protocoles de rééducation, nous n'avons pas mis en évidence de phénomènes allant à l'encontre des recommandations fournies aux utilisateurs en phase d'apprentissage, ce qui est une nouvelle rassurante. Par contre, nous pouvons mieux comprendre pourquoi certaines actions ont un taux de succès plus faible que d'autres ainsi que les mécanismes de régulation de la locomotion et de représentation spatiale associés. Ceci donnera lieu à un nouveau chapitre du manuel de formation au Tom Pouce III à usage des instructeurs de locomotion. Ce dernier permettra :

- de mieux distinguer les actions à base d'informations d'origine écologiques qui doivent faire l'objet d'un apprentissage perceptif (au sens gibsonien du terme) et celles demandant de construire une représentation spatiale cognitive chez la personne ;
- de fournir un classement des actions par niveau de difficulté.

Nous avons par ailleurs mis en évidence des lacunes dues à l'appareil et ses conséquences sur la déambulation de l'utilisateur, notamment sur l'amplitude du champ angulaire de perception aux courtes distances. **Augmenter ce champ permettra d'utiliser un contrôle écologique pour un bon nombre d'actions de régulation qui demandent actuellement de la représentation spatiale, ce qui améliorera la fiabilité des utilisateurs.** La balle est dans le camp des physiciens des capteurs pour y parvenir.

VI. Bibliographie

A

Ammons, C. H., Worchel, P., & Dallenbach, K. (1953). "Facial vision": The perception of obstacles out of doors by blindfolded and blindfolded-deafened subjects. *American Journal of Psychology*, 66, 519-553.

Arias, C.; Curet, C.A.; Moyano, H.F.; Joekes, S.; Blanch, N. (1993). Echolocation: A Study of Auditory Functioning in Blind and Sighted Subjects. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 87(3), 73-77. doi:[10.1177/0145482X9308700305](https://doi.org/10.1177/0145482X9308700305)

Arias C. (1996). L'écholocation humaine chez les handicapés visuels. *L'année psychologique*, 96(4), 703-721, doi : <https://doi.org/10.3406/psy.1996.28926>

Antoun, S.M.; McKerrow, P.J. (2010). [ACM Press the 3rd International Symposium - Toronto, Ontario, Canada (2010.05.10-2010.05.10)] Proceedings of the 3rd International Symposium on Practical Cognitive Agents and Robots - PCAR '10 - Mimicking a blind person navigating a corridor using a K-Sonar with a mobile robot. , (0), 1-8, doi:10.1145/1967112.1967113

B

Black, A., & Wood, J. (2005). Vision and falls. *Clinical and Experimental Optometry*, 88, 212-222.

Buissard, I. (2014). La locomotion : Un savoir-faire, un savoir-être au service des personnes déficientes visuelles. *Revue Francophone d'Orthoptie*, 7(2), 138-140. <https://doi.org/10.1016/j.rfo.2014.07.004>

Barber, E O., & Lederman, S. J. (1988). Encoding direction in manipulatory space and the role of visual experience. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 82, 99-106.

Brussell, E.M., White, C.W., Bross, M., Mustillo, P. & Borenstein, M. (1981). Multi-flash campimetry. *Multiple sclerosis, Current Eye Research*, 1(11), 671-677, DOI: [10.3109/02713688109001871](https://doi.org/10.3109/02713688109001871)

Bach-y-Rita, P. (1996). Nonsynaptic Diffusion Neurotransmission and Brain Plasticity. *The Neuroscientist*, 2(5), 260-261. Doi:10.1177/107385849600200511

Baker, C.S, & Cinelli, M.E. (2017). The effects of obstacle proximity on aperture crossing behaviours. *Experimental brain research*, 235(2), 497-506.

C

Carrer, C. (2012). La performance de se déplacer quand on ne voit pas. *Empa*, 87(3), 63-66. <https://doi.org/10.3917/empa.087.0063>

Cotzin, M., & Dallenbach, K. M. (1950). Facial vision: The role of pitch and loudness in the perception of obstacles by the blind. *American Journal of Psychology*, 63, 485-515.

Collins, C.C., Bach y Rita, P. (1973). Transmission of pictorial information through the skin. *Advances in Biological and Medical Physics*, 14, 285-315.

Caillot C. L'oxygène à usage médical: dispensation, indications, toxicité, rôle du pharmacien. Sciences pharmaceutiques", Thèse de doctorat en Pharmacie, sous la direction de Pierre LABRUDE, Nancy, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004, 152 p.

D

Droits et Assurances. (2016). Tiers Temps et Aménagement des Examens. AFA association Française, Paris, France.

Dos Santos, A.D.P., Medola, F.O., Cinelli, M.J., Garcia Ramirez, A.R. and Sandnes, F.E. (2021). Are electronic white canes better than traditional canes? A comparative study with blind and blindfolded participants. *Universal Access in the Information Society*, 20(1), 93-103.

Davis, T.J., Riley, M.A., Shockley, K. and Cummins-Sebree, S. (2010). Perceiving affordances for joint actions. *Perception*, 39(12), 1624-1644.

De Paz, C., Travieso, D., Ibáñez-Gijón, J., Bravo, M., Lobo, L. and Jacobs, D.M. (2019). Sensory substitution: The affordance of passability, body-scaled perception, and exploratory movements. *Plos one*, 14(3), p.e0213342.

Damaschini, R., Legras, R., Leroux, R. and Farcy, R. (2005). Electronic travel aid for blind people. Assistive technology. *From virtuality to reality*, 16(1), 251-255.

Dernayka, A., Amorim, M.A., Leroux, R., Bogaert, L. & Farcy, R. (2021). Tom Pouce III, an Electronic White Cane for Blind People: Ability to Detect Obstacles and Mobility Performances. *Sensors*, 21(20), 6854.

Dernayka, A., Amorim, M.A., Leroux, R., Zogaghi, A. & Farcy, R. (2019). Etude préliminaire d'un test de mesure de la capacité d'une personne à franchir un passage sans perception visuelle. IFRATH. *Paris*.

E

Enquête HID. (2015). La population en situation de handicap visuel en France Importance, caractéristiques, incapacités fonctionnelles et difficultés sociales Une exploitation des enquêtes HID 1998 et 1999, Observatoire régional de la santé des Pays de la Loire.

Elli, G.V., Benetti, S. & Collignon, O. (2014). Is there a future for sensory substitution outside academic laboratories?. *Multisensory research*, 27(5-6), 271-291.

F

Farcy, R. (2020). Instructeur, Manuel. "Tom Pouce III." Master. France. HAL Id: hal-03661768, version 1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03661768>

Fédération des aveugles en France, "Le braille : un système universel pour les personnes aveugles, <https://aveuglesdefrance.org/le-braille-un-systeme-universel-pour-les-personnes-aveugles/>

Ferrand S., Alouges F., Aussal M. (2020). An electronic travel aid device to help blind people playing sport. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*.

Favela, L.H., Riley, M.A., Shockley, K. and Chemero, A. (2018). Perceptually equivalent judgments made visually and via haptic sensory-substitution devices. *Ecological Psychology*, 30(4), 326-345.

Finocchietti, Sara; Cappagli, Giulia; Gori, Monica (2017). Auditory Spatial Recalibration in Congenital Blind Individuals. *Frontiers in Neuroscience*, 11(), -. doi:10.3389/fnins.2017.00076

Finocchietti, S., Cappagli, G. and Gori, M. (2015). Encoding audio motion: spatial impairment in early blind individuals. *Frontiers in psychology*, 6, 1357.

Farcy, R., Denise, B., & Damaschini, R. (1996). Triangulating laser profilometer as a navigational aid for the blind: optical aspects. *Applied Optics*, 35(7), 1161-1165.

G

Griffon P. (1993). La rééducation des malvoyants, février, Editions Privat Collection Pratique Sociales, 168 pages.

Gibson, E.J. and Schumuckler, M.A. (1989). Going somewhere: An ecological and experimental approach to development of mobility. *Ecological psychology*, 1(1), 3-25.

Gibson, J. J., & Gibson, E. J. (1955). Perceptual learning: Differentiation or enrichment?. *Psychological Review*, 62(1), 32–41.

Gaunet, F. & Thinus-Blanc, C. (1997). Early-blind subjects' spatial abilities in the locomotor space: exploratory strategies and reaction-to-change performance. *Perception*, 25, 967-81.

Guth, D.A., Rieser, J.J. and Ashmead, D.H. (2010). Perceiving to Move and moving to perceive : Control of locomotion by students with vision loss, in Blasch, Bruce B. Foundations of Orientation and Mobility, 1, Third Edition, AFB, Press American, New York, NY 10121, pp.3-44.

Gibson, J. (1977). The Theory of Affordances. In Perceiving, Acting, and Knowing, Eds. Robert Shaw and John Bransford, (ISBN 978-0-470-99014-8).

Gaver, William W. (1991). Technology affordances. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 79-84.

Genzel, D., Schutte, M., Brimijoin, W. O., MacNeilage, P. R., & Wiegrebe, L. (2018). Psychophysical evidence for auditory motion parallax. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16), 4264–4269. doi:10.1073/pnas.1712058115

H

Hajnal, A., Abdul-Malak, D. T., & Durgin, F. H. (2011). The perceptual experience of slope by foot and by finger. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(3), 709–719. doi:10.1037/a0019950

Hollins, M., & Kelley, E.K. (1988). Spatial updating in blind and sighted people. *Perception & Psychophysics*, 43, 380-388.

Hill, E.W., Rieser, J.J., Hill, M.M., Hill, M., Halpin, J. & Halpin, R. (1993). How persons with visual impairments explore novel spaces - strategies of good and poor performers. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 87(8), 295-301.

Hsu-Lin L.Y., d. C. (2016). The Argus[®] II Retinal Prosthesis System. *Progress in Retinal and Eye Research*, 50, 89-107.

Hersh, M. A.; García Ramírez, A. R. (2018). Evaluation of the electronic long cane: improving mobility in urban environments. *Behaviour & Information Technology*, 1–21. doi:10.1080/0144929x.2018.1490454

I

Aziz, I. A., Mahamad, S., Mehat, M., & Samiha, N. (2008). Blind echolocation using ultrasonic sensors. 2008 International Symposium on Information Technology. doi:10.1109/itsim.2008.4631900

J

Jiménez, J., Olea, J., Torres, J., Alonso, I., Harder, D. and Fischer, K. (2009). Biography of louis braille and invention of the braille alphabet. *Survey of ophthalmology*, 54(1), 142-149.

Jeong, G.Y. & Yu, K.H. (2016). Multi-Section Sensing and Vibrotactile Perception for Walking Guide of Visually Impaired Person. *Sensors*, 16(7), 1070–. doi:10.3390/s16071070

Johnson, R.A. and Wichern, D.W. (2007). Applied multivariate statistical analysis. 6th. New Jersey, US: Pearson Prentice Hall.

K

Kennedy, J. M. (1982). Haptic pictures. In W. Schiff, & E. Foulke (Eds.), *Tactual perception: A source-book* (pp. 305-333). Cambridge, England: Cambridge University Press.

Kellogg, W.N. (1962). Sonar System of the Blind: New research measures their accuracy in detecting the texture, size, and distance of objects" by ear." *Science*, 137(3528), 399-404.

Kim, Y., Moncada-Torres, A., Furrer, J., Riesch, M. and Gassert, R. (2016). Quantification of long cane usage characteristics with the constant contact technique. *Applied ergonomics*, 55, 216-225.

Kunz, B.R., Creem-Regehr, S.H. and Thompson, W.B. (2013). Does perceptual-motor calibration generalize across two different forms of locomotion? Investigations of walking and wheelchairs. *PLoS one*, 8(2), p.e54446.

Kim, S. Y., & Cho, K. (2013). Usability and design guidelines of smart canes for users with visual impairments. *International Journal of Design*, 7(1), 99-110

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

Kiuru, T., Metso, M., Utriainen, M., Metsävainio, K., Jauhonen, H.M., Rajala, R., Savenius, R., Ström, M., Jylhä, T.N., Juntunen, R. and Sylberg, J., 2018. Assistive device for orientation and mobility of the visually impaired based on millimeter wave radar technology—Clinical investigation results. *Cogent Engineering*, 5(1), p.1450322.

L

Legood, R., Scuffham, P., & Cryer, C. (2002). Are we blind to injuries in the visually impaired? A review of the literature. *Injury Prevention*, 8, 155-160.

Loomis, J. (2003). Visual Space perception phenomenology and function. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia*, 66 (6), 26 – 29.

Lee, D. N. (1978). Modes of perceiving and processing information. *Modes of Perceiving and Processing Information* (pp. 159-170).

Loomis, J.M., Da Silva, J.A., Fujita, N. and Fukusima, S.S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal of experimental psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 906 – 921.

Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: Assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122, 73-91.

Loomis, J.M., Lippa, Y., Klatzky, R.L. and Golledge, R.G. (2002). Spatial updating of locations specified by 3-d sound and spatial language. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(2), 335 – 345.

Long R., Giudice N. Establishing and Maintaining orientation for Mobility, in Blasch, Bruce B., Foundations of Orientation and Mobility, Third edition, chapter 2, 2010, AFB Press American, New York, NY 10121.

Lucaites, K.M. and Pagano, C.C. (2018). Affordance perception by users of assistive walking devices. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1), 1744-1748).

Luo, Y.H.L. and Da Cruz, L. (2016). The Argus® II retinal prosthesis system. *Progress in retinal and eye research*, 50, 89-107.

Labauve, O., Deroche, T., Teulier, C. and Berret, B. (2020). Vigor of reaching, walking, and gazing movements: on the consistency of interindividual differences. *Journal of neurophysiology*, 123(1), 234-242.

M

Manduchi, R., & Kurniawan, S. (2011). Mobility-related accidents experienced by people with visual impairment. *Research and Practice in Visual Impairment and Blindness*, 4, 44 – 54.

Milner, A. (1995). M. Goodale The Visual Brain in Action. *Oxford Psychology Series*, 27.

Morgan, M. J. (1978). Molyneux's question. Cambridge, England: Cambridge University Press.

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>

Mittelstaedt, M.L. (1980). Homing by path integration in a mammal. *Naturwissenschaften*, 68, 566.

Millar S. (1994). *Understanding and Representing Space: Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children*. Oxford: Oxford University Press; 1994.

Millar, S. (2000). Modality and mind: convergent active processing in interrelated networks as a model of development and perception by touch. *Touch, representation and blindness*, 99-141.

Mohler, B.J., Thompson, W.B., Creem-Regehr, S.H., Willemsen, P., Pick, Jr, H.L. and Rieser, J.J., 2007. Calibration of locomotion resulting from visual motion in a treadmill-based virtual environment. *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 4(1), 4-es.

Montagné, G., 2007. *L'inclusion des personnes aveugles et malvoyantes dans le monde d'aujourd'hui*. Paris: Ministère du travail, des relations sociales et de la solidarité. Paris, France.

Mandru, D., Lungu, I., Mociran, A. and Tătar, O. (2007). Development of a mechatronic blind stick. *Fascicle of Management and Technological Engineering*, 6(16), 797-802.

Masson, G.S. & Mestre, D.R. (1998). A look into the black box: Eye movements as a probe of visual motion processing. *Current Psychology of Cognition*, 17, 807-830.

N

Nyman, S.R., Gosney, M.A. and Victor, C.R. (2010). Psychosocial impact of visual impairment in working-age adults. *British Journal of Ophthalmology*, 94(11), 1427-1431.

O

OMS, <http://www.thebaudieres.org/index.php/la-population-accueillie/38-pathologies>

OMS (World Health Organization). (1993). Study protocol for the World Health Organization project to develop a Quality of Life assessment instrument (WHOQOL). *Quality of life Research*, 2(2), 153–159.

O'Brien, E.E.; Mohtar, A.A.; Diment, L.E.; Reynolds, K.J. (2014). A Detachable Electronic Device for Use With a Long White Cane to Assist With Mobility. *Assistive Technology*, 26(4), 219–226. doi:10.1080/10400435.2014.926468

P

Penrod, W.; Corbett, M.D.; Blasch, B. (2005). Practice Report: A Master Trainer Class for Professionals in Teaching the UltraCane Electronic Travel Device. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 99(11), 711–715. doi:10.1177/0145482x0509901110

Pyun, R., Yeongmi Kim, Wespe, P., Gassert, R., & Schneller, S. (2013). *Advanced Augmented White Cane with obstacle height and distance feedback*. *IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*. doi:10.1109/icorr.2013.6650358

Chanana, P., Paul, R., Balakrishnan, M. and Rao, P.V.M. (2017). Assistive technology solutions for aiding travel of pedestrians with visual impairment. *Journal of rehabilitation and assistive technologies engineering*, 4, 2055668317725993.

Pigeon C. (2016). Mobilisation attentionnelle des piétons aveugles : effet de l'âge, de l'antériorité de la cécité et de l'aide à mobilité utilisé, Thèse de doctorat en Neuropsychologie, sous la direction de Claude MARIN-LAMELLET, Lyon, Université Lumière Lyon 2, 303.

Pinquart, M., & Pfeiffer, J. P. (2011). Psychological well-being in visually impaired and unimpaired individuals. A meta-analysis. *British Journal of Visual Impairment*, 29(1), 27–45.

Piriou, C.-N. (1999). L'instruction de la locomotion pour les personnes aveugles. *Evolutions psychomotrices*, (44), 59-64.

Pick, H.L., Warren, D.H., & Hay, J.C. (1969). Sensory conflict in judgments of spatial direction. *Perception and Psychophysics*, 6, 203-205.

Paillard, J., 1980. Le corps situé et le corps identifié. *Rev. Méd. Suisse Romande*, 100(2), pp.129-141.

Pogrud, R.L. and Fazzi, D.L. (2002). *Early focus: Working with young blind and visually impaired children and their families*. American Foundation for the Blind.

R

Ratelle A. et Couturier J.-A. (2019). Manuel d'intervention en orientation et mobilité. Canada, Québec. Les Presses de l'Université de Montréal PUM, ISBN 978-2-7606-3905-8/5.

Raynard F. (1991). *Se mouvoir sans voir*. Editions Yva Peyret.

Rice, C. E., & Feinstein, S. H. (1965). Echo detection ability of the blind: Size and distance factors. *Journal of Experimental Psychology*, 70, 246-251.

Rieser, J.J. (1983). Environmental learning: Is it spatial or visual. In *meeting of the XIX Inter-American Congress of Psychology, Quito, Ecuador*.

Rieser, J.J., Lockman, J.J. & Pick, H.L. (1980). The role of visual experience in knowledge of spatial layout. *Perception & Psychophysics*, 28, 185–190. <https://doi.org/10.3758/BF03204374>.

Rieser, J.J., & Heiman, M. L. (1982). Spatial self-reference systems and shortest-route behavior in toddlers. *Child Development*, 53, 524-533.

Rieser, J. J., Guth, D. A., & Hill, E. W. (1986). Sensitivity to perspective structure while walking without vision. *Perception*, 15, 173-188.

Rieser, J.J. (1990). Development of perceptual-motor control while walking without vision: The calibration of perception and action. *Sensory-motor organizations and development in infancy and early childhood*, pp.379-408.

Rieser, J.J., Pick, H.L., Ashmead, D.H. and Garing, A.E. (1995). Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(3), p.480 - 497.

Roentgen, U.R., Gelderblom, G.J. and de Witte, L.P. (2012). User evaluation of two electronic mobility aids for persons who are visually impaired: a quasi-experimental study using a standardized mobility course. *Assistive Technology*, 24(2), pp.110-120.

Ramirez, A.R.G., da Silva, R.F.L., Cinelli, M.J. & de Albornoz, A.D.C. (2012). Evaluation of electronic haptic device for blind and visually impaired people: a case study. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 32(6), 423-428.

Riehm, C., Chemero, A., Silva, P.L. and Shockley, K. (2019). Virtual auditory aperture passability. *Experimental Brain Research*, 237(1), 191-200.

Smith, L., & Penrod, W. Adaptive Technology for Orientation and Mobility, in Blasch, Bruce B. *Foundations of Orientation and Mobility*, Third Edition, 2010, Chapter 8, AFB, Press American, New York, NY 10121

Reppert, T.R., Rigas, I., Herzfeld, D.J., Sedaghat-Nejad, E., Komogortsev, O. and Shadmehr, R. (2018). Movement vigor as a traitlike attribute of individuality. *Journal of neurophysiology*, 120(2), 741-757.

S

Sander, M.S., Bournot, M.C., Lelièvre, F. and Tallec, A. (2005). La population en situation de handicap visuel en France: importance, caractéristiques, incapacités fonctionnelles et difficultés sociales. Exploitation d'enquêtes HID 1998/99. *Observatoire Régional de la Santé des Pays de la Loire* 2005.

Strelow, E.R. (1985). What is Needed for a Theory of Mobility : Direct Perception and Cognitive Maps – Lessons From the Blind. *Psychological Review*, 92 (2), 226 – 248.

Strelow, E.R & Brabyn, J.A. (1982). Locomotion of the blind controlled by natural sound cues. *Perception*, 11, 635 – 640.

Niemeyer, W. and 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.

Schinazi, V.R. (2007). *Representing space: the development, content and accuracy of mental representations by the blind and visually impaired*. University of London, University College London (United Kingdom).

Schinazi, V.R., Thrash, T. and Chebat, D.R. (2016). Spatial navigation by congenitally blind individuals. *WIREs Cognitive Science*, 7(1), 37 – 58. doi:10.1002/wcs.1375.

Soto-Faraco, S., Spence, C., Fairbank, K., Kingstone, A., Hillstrom, A.P. and Shapiro, K. (2002). A crossmodal attentional blink between vision and touch. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 731-738.

Smith, L., and Penrod, W. (2010). Adaptive Technology for Orientation and Mobility, in Blasch, Bruce B. *Foundations of Orientation and Mobility*, Third Edition, Chapter 8.

Sapp, W. (2011). Somebody's jumping on the floor: Incorporating music into orientation and mobility for preschoolers with visual impairments. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 105(10), 715-719.

Steenhuis, R.E. & Goodale, M.A. (1988). The effects of time and distance on accuracy of target-directed locomotion: Does an accurate short-term memory for spatial location exist?. *Journal of Motor Behavior*, 20(4), 399-415.

T

Thinus-Blanc, C., & Gaunet, F. (1997). Representation of space in blind persons: Vision as a spatial sense? *Psychological Bulletin*, 121(1), 20-42.

Thomson, J.A. (1980). How do we use visual information to control locomotion? *Trends in Neurosciences*, 3(10), 247-250.

Thomson, J.A. (1983). Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9(3), 427

V

Vorapatratorn, S.; Nambunmee, K. (2014). iSonar: an obstacle warning device for the totally blind. *Journal of Assistive, Rehabilitative & Therapeutic Technologies*, 2(1), 23114-. doi:10.3402/jartt.v2.23114

W

Warren, D.H. and Pick, H.L. (1970). Intermodality relations in localization in blind and sighted people. *Perception & Psychophysics*, 8, 430-432.

Warren, D. H. (1970). Intermodality interactions in spatial localization. *Cognitive Psychology*, 1, 114-133.

Warren Jr, W.H. and Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 13(3), 371.

Z

Zhao, H., Plaisant, C. and Shneiderman, B., (2005). iSonic: interactive sonification for non-visual data exploration. In *Proceedings of the 7th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 194-195.

VI. Annexes

Annexe 1: Méthode de mesure : pointage locomoteur vers un objet distant

On recherche l'écart entre la position du sujet qui a pris la place du poteau et la position du poteau afin de déterminer la déviation angulaire et l'écart en distance des deux positions (Figure A1.1).

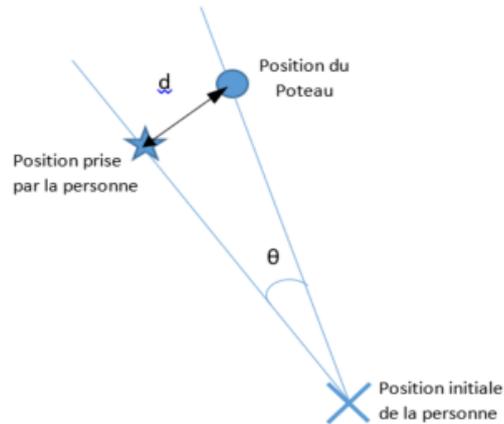


Figure A1-1 : Ecart de position entre le poteau et de la personne

Le point O origine des coordonnées (O,x,y) est placé au milieu de deux poteaux servant aux mesures appelés respectivement Pg (poteau de Gauche) et Pd (poteau dedroite). L'axe (O,x) est parallèle à celui des deux poteaux de mesure. La position initiale du sujet est le point O, avec son axe corporel dirigé vers l'axe (O,y) perpendiculaire à (O,x) (Figure A1.2).

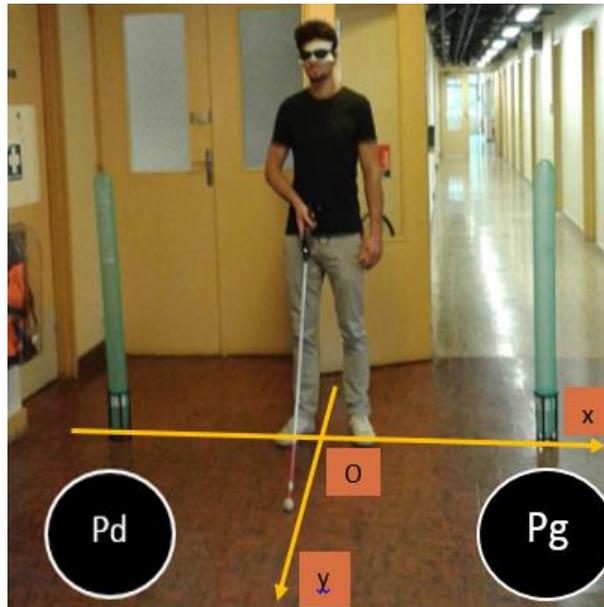


Figure A1.2 : Photo représentant les poteaux Pd et Pg ainsi que les axes (O,x) et (Oy) ainsi que la position initiale du sujet.

On se sert d'un mètre ruban pour mesurer la distance $2a$ entre les 2 poteaux, la position du point O est marquée au sol.

Coordonnées des poteaux de référence : Pg (-a, 0) ; Pd (a, 0)

- a. Mesure de la position du poteau P(x, y) à atteindre

On place une marque au sol au centre du poteau, on retire le poteau et on place un trépied au-dessus du centre (Figure A1.3).

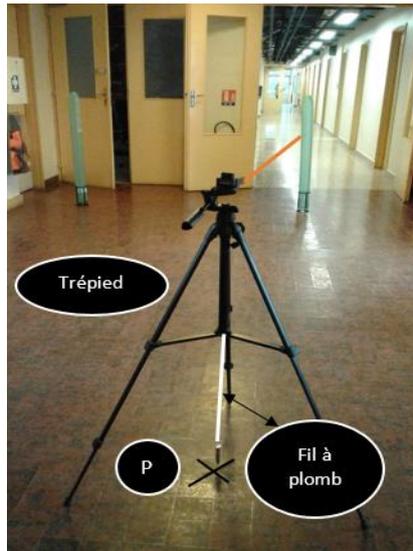


Figure A1.3 : Photo représentant le trépied portant le laser et le fil à plombs au-dessus de la position du poteau à pointer. Le trait rouge représente le faisceau laser du télémètre qui mesure la distance d_1 .

On se sert d'un télémètre laser placé sur le trépied (télémètre dans un plan horizontal réglé par niveau à bulle) pour pointer successivement les centres des deux poteaux Pg et Pd.

Soit d_1 la distance (Pg, P) et d_2 la distance (Pd, P) (Figure A1.4).

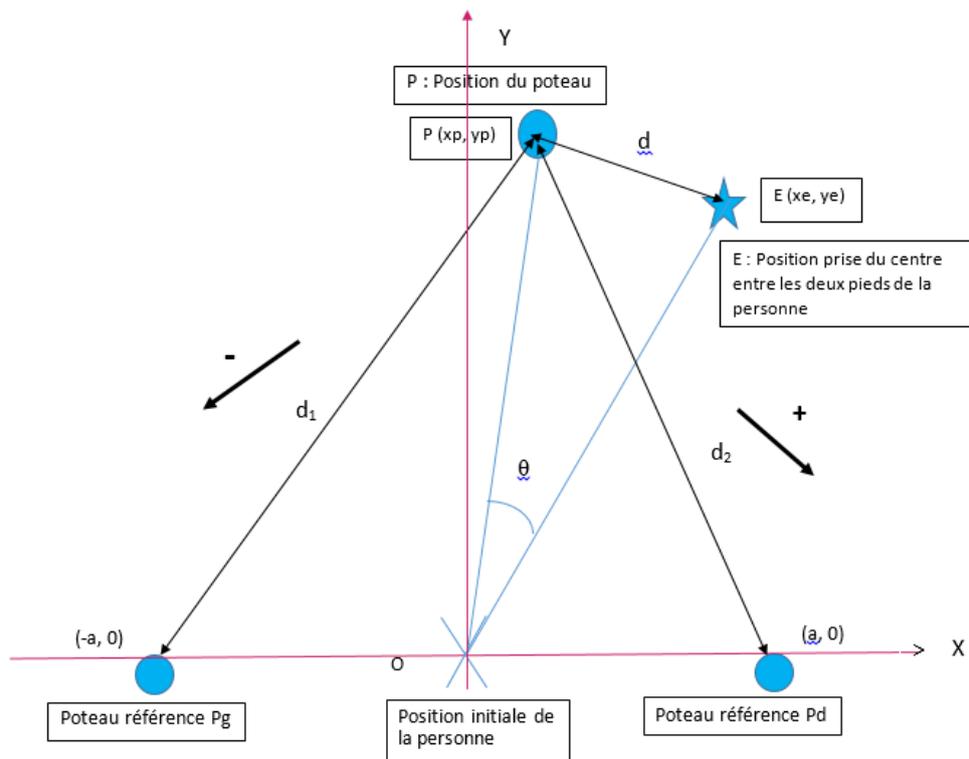


Figure A1.4 : Schéma représentant l'ensemble des variables utilisées dans les calculs.

On retrouve les coordonnées (x_p, y_p) du point P par les formules suivantes :

$$d_1^2 = (x_p + a)^2 + y_p^2 \quad ; \quad d_2^2 = (x_p - a)^2 + y_p^2$$

D'où : $x_p = (d_1^2 + d_2^2) / 4a$ et $y_p = (d_2^2 - (x-a)^2)^{1/2}$

- b. Mesure de la distance entre P (x_p, y_p) et la position pointée par le centre des deux pieds de la personne E (x_e, y_e).



Figure A1.5 : Représentation de la prise de marque pour la position à laquelle s'est arrêtée la personne.

On place une marque au sol sur la position du point E (figure A1.5). On mesure de la même façon que pour le poteau les coordonnées du point E (trépied, mesures au télémètre des distances aux coutures des poteaux, etc.)

La distance d qui représente l'erreur de distance de pointage du sujet entre P et E est donnée par $d = ((x_e - x_p)^2 + (y_e - y_p)^2)^{1/2}$

L'angle θ entre (O, P) et (O, E) qui représente la déviation du pointage du sujet est donnée par :

$$\theta = \text{Arctg}(x_e/y_e) - \text{Arctg}(x_p/y_p)$$

On réalise un tableau Excel sur tablette permettant d'afficher directement d et θ à partir de d_1 , d_2 et a .

La vérification des valeurs de d et θ par la méthode du trépied laser et une méthode de mesure directe au sol avec des ficelles a montré une concordance de l'ordre du cm et de $0,3^\circ$, largement suffisante par rapport aux incertitudes inhérentes à la méthode : précision de la définition de la position de la pointe du pied, repérage de la position du centre du poteau etc. Une différence de 2 ou 3 cm n'aura pas de signification dans ce type de protocole au vu de la méthode de mesure.

Questionnaire sujet étude « Pointage Locomoteur »

Pour les non-voyants

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous le nombre d'essais ?

1. Trop long 2. Long 3. Suffisant 4. Autres :

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience pour l'audition ?

1. Intéressante 2. Ennuyante 3. Le son n'est pas clair 4. Fatigante 5. Autres :

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience avec la canne TP3 ?

1. Intéressante 2. Fatigante 3. Ennuyante 4. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez du temps de la prise de l'information (5 secondes) ?

1. Peu (audition / TP3) 2. Suffisant (audition / TP3) 3. Beaucoup (audition / TP3)
4. Autres : ..

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Commentaires :

Pour les voyants

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous le nombre d'essais ?

1. Trop long 2. Long 3. Suffisant 4. Autres :

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience pour l'audition ?

1. Intéressante 2. Ennuyante 3. Le son n'est pas clair 4. Fatigante 5. Autres :
.....

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience avec la vision ?

1. Intéressante 2. Fatigante 3. Ennuyante 4. Autres :
.....

Qu'est-ce que vous pensez du temps de la prise de l'information (5 secondes) ?

1. Peu (audition / Vision) 2. Suffisant (audition / Vision) 3. Beaucoup (audition / Vision) 4.
Autres : ..

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Qu'est-ce que vous avez apprécié

:

Autres :

Commentaires :

Annexe 3 : Questionnaire du protocole expérimental Choix de passage

Questionnaire sujet : étude choix du passage

Pour les voyants et les non-voyants

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous les 5 essais d'entraînement ?

1. Peu 2. Suffisant 3. Beaucoup 4. Autres :

Comment trouvez- vous les questions demandées durant le test ?

1. Intéressantes 2. Difficiles/ très difficiles 3. Faciles/ très faciles 4. Longues 5. faisables

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience ?

1. Intéressante 2. Ennuyante 3. Supportable 4. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez du temps de l'étude ?

1. Suffisante 2. Longues 3. Peu 4. Autres :
.....

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Que pensez-vous de la difficulté de l'exercice ?

1. Difficile ou très difficile 2. De difficulté moyenne 3. Facile 4. Très facile
5. Autres :

L'exercice ressemble-t-il à une situation de la vie courante ?, si oui laquelle ?

.....
.....

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Qu'est-ce que vous avez apprécié :

Autres :

Commentaires :

Annexe 4 : Questionnaire du protocole expérimental perception de la passabilité

Questionnaire du déroulement de l'étude choix du passage
Pour les voyants et les non-voyants

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous le nombre d'essais d'entraînement ?

1. Peu 2. Suffisant 3. Beaucoup 4. Autres :

Comment trouvez- vous l'exercice et les différentes modalités durant le test ?

1. Intéressantes 2. Difficiles/ très difficiles 3. Faciles/ très faciles 4. Longues
5. faisables

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience ?

1. Intéressante 2. Ennuyante 3. Supportable 4. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez du temps de l'étude ?

1. Suffisante 2. Longues 3. Peu 4. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Que pensez-vous de la difficulté de l'exercice ?

1. Difficile ou très difficile 2. De difficulté moyenne 3. Facile 4. Très facile
5. Autres :

Que pensez-vous de la pertinence des modalités avec Feedback et sans Feedback ?

1. Perturbant 2. Intéressant 3. Facile/difficile d'estimer à distance sans passer
4. Facile/difficile d'estimer à distance après passer

L'exercice ressemble-t-il à une situation de la vie courante ?, si oui laquelle ?

.....

..... Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Qu'est-ce que vous avez apprécié :

Autres :

Commentaires :

Que pour les non-voyants

Que pensez-vous de la pertinence de la modalité à la canne simple en comparant au TP3 ? Et inversement ?

Questionnaire du déroulement de l'étude navigation simple

Pour les non-voyants uniquement

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous le nombre d'essais ?

1. Peu 2. Suffisant 3. Beaucoup 4. Autres :

.....

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience ?

1. Motivant 2. Amusant 3. Supportable 4. Ennuyant 5. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez de l'étude ?

1. Intéressante 2. Amusante 3. Fatigante 4. Ennuyante 5. Autres

.....

Comment trouvez- vous l'utilisation du TP3 en 4m ?

1. Très difficile 2. Difficile 3. Facile 4. Très fatiguant 5. Fatiguant (au niveau du poignet) 6. Peu fatiguant

7. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Que pensez-vous de la difficulté de l'exercice ?

1. Difficile ou très difficile 2. De difficulté moyenne 3. Facile 4. Très facile 5. Autres :

.....

L'exercice ressemble-t-il à une situation de la vie courante ?, si oui laquelle ?

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Qu'est-ce que vous avez apprécié :

Autres :

Commentaires :

Annexe 6 : Questionnaire du protocole expérimental navigation répétée

Questionnaire du déroulement de la navigation répétée pendant en 20 minutes

Pour les non-voyants uniquement au TP3

Ce questionnaire est complètement anonyme. Vous pouvez entourer une ou plusieurs réponses comme vous pouvez aussi marquer d'autres réponses dans la case « Autres » :

Date et heure :

Comment trouvez- vous le temps de l'étude ?

1. Peu 2. Suffisant 3. Beaucoup 4. Autres :

Comment trouvez- vous le principe de l'expérience ?

1. Intéressant 2. Fatigant 3. Supportable 4. Ennuyant 5. Autres :
.....

Qu'est-ce que vous pensez de l'étude ?

1. Intéressante 2. Amusante 3. Fatigante 4. Ennuyante 5. Autres :
.....

Comment trouvez- vous l'utilisation du TP3 en 4m ou 6m ?

1. Très difficile 2. Difficile 3. Facile 4. Très fatigant 5. Fatigant (au niveau du poignet)
6. Peu fatigant 7. Autres :

Qu'est-ce que vous pensez des conditions du déroulement de l'étude ?

1. Agréable 2. Stressante 3. Sécurisée 4. Confortable 5. Autres :

Que pensez-vous de la difficulté de l'exercice ?

1. Difficile ou très difficile 2. De difficulté moyenne 3. Facile 4. Très facile
5. Autres :

L'exercice ressemble-t-il à une situation de la vie courante ?, si oui laquelle ?

Qu'est-ce qui vous a le plus gêné dans l'étude :

Qu'est-ce que vous avez apprécié :

Autres :

Commentaires :