



HAL
open science

Contribution a la télémétrie optique active pour l'aide aux déplacements des non-voyants

Joselin Villanueva

► **To cite this version:**

Joselin Villanueva. Contribution a la télémétrie optique active pour l'aide aux déplacements des non-voyants. Autre [cond-mat.other]. Université Paris Sud - Paris XI, 2011. Français. NNT : 2011PA112061 . tel-00598605

HAL Id: tel-00598605

<https://theses.hal.science/tel-00598605>

Submitted on 7 Jun 2011

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.

Université Paris Sud XI
Ecole Doctorale "Ondes et matière"
Laboratoire Aimé Cotton, UPR3321

Manuscrit de Thèse de Doctorat

Contribution à la télémétrie optique active pour l'aide aux déplacements des non-voyants

par

Joselin Villanueva

Soutenue le 16 mai 2011 devant la commission d'examen :

RAPPORTEURS

Thierry Bosch : Professeur et directeur du LOSE, ENSEEIHT-INPT,
Toulouse
Patrick Sandoz : Chargé de Recherche CNRS, Université de Franche-
Comté, Besançon

EXAMINATEURS

Jean-Louis Meyzonnette : Professeur de l'Institut d'Optique Graduate School,
Palaiseau
Avinoam Safram : Médecin, chef du service d'Ophtalmologie des Hopitaux
Universitaires de Genève
Auguste D'Aligny : Directeur scientifique, Trimble France

DIRECTEUR

René Farcy : Professeur, Université Paris Sud XI, Laboratoire Aimé
Cotton, Orsay

Table des matières

Table des matières	i
1 Introduction générale	3
2 État de l'art et besoins	5
2.1 La déficience visuelle	5
2.1.1 Classification et statistiques	5
2.1.2 La locomotion	7
2.2 Les aides électroniques au déplacement (ETAs)	11
2.3 Développements des ETAs	12
2.3.1 Avant 1970	12
2.3.2 La période 1970-2000	16
2.3.3 La période actuelle post 2000	18
2.4 L'évaluation des appareils	23
2.4.1 Tests d'évaluation basés sur l'observation de l'utilisateur	25
2.4.2 Tests subjectifs sur le ressenti utilisateur	26
2.5 L'approche de l'équipe et la situation en 2007	26
2.5.1 Chronologie des technologies et appareils développés	27
2.5.2 La pratique des dispositifs	32
2.6 Objectifs de la thèse	35
3 La détection infrarouge	37
3.1 Introduction	37
3.2 Objectif du chapitre	37
3.3 Le proximètre infrarouge	39
3.3.1 Principe de fonctionnement	39
3.3.2 Champ de perception	40
3.3.3 Calculs photométriques avec des obstacles typiques	40
3.3.4 Calculs théoriques et expérimentation	44
3.4 Appareils implémentés avec la proximétrie infrarouge	54

3.4.1	Le <i>Tom Pouce II</i>	54
3.4.2	Le <i>Minitact</i>	54
3.4.3	Appareil pour la protection du bas au sol	54
3.4.4	Appareil pour la protection de la tête.	56
3.4.5	<i>Minitacts</i> et fauteuil électrique	58
3.4.6	Détection d'obstacles avec le <i>Minitact</i> et le <i>Tom Pouce</i>	59
3.5	Bilan de liaison	62
3.6	Sécurité oculaire	62
3.7	Conclusion	63
4	La télémétrie laser	65
4.1	Introduction	65
4.1.1	Types de télémètres laser	65
4.1.2	Expériences acquises sur les télémètres avant cette thèse	66
4.1.3	Systèmes alternatifs à évaluer	67
4.2	La triangulation laser	70
4.2.1	Principe de fonctionnement	70
4.2.2	Condition de Scheimpflug	70
4.2.3	Erreur absolue (hors Scheimpflug)	71
4.2.4	Compromis de conception de la tête optique	71
4.2.5	La structure mécanique de la tête optique	74
4.2.6	La barrette CMOS	76
4.2.7	Amélioration de la précision par interpolation	78
4.2.8	L'instabilité laser	81
4.2.9	Cadence de la mesure	81
4.2.10	La mécanique	81
4.2.11	Tests en conditions extrêmes	82
4.3	<i>Téléact III</i>	83
4.4	Capacités de détection du télémètre laser	85
4.5	Conclusions	86
5	Evaluation des appareils réalisés	87
5.1	Introduction	87
5.2	Détection d'un passage	88
5.2.1	Méthode	89
5.2.2	Résultats	89
5.3	Trajectoires de contournement d'obstacles	90
5.3.1	Technique de contournement	91
5.3.2	Résultats et discussion	92
5.4	Conclusion	97
6	Problème de l'identification d'objets spécifiques sur un trajet	101

6.1	Introduction	101
6.2	Etat de l'art des dispositifs pour non-voyant à base d'images	102
6.2.1	Système électro-tactile	102
6.2.2	<i>The vOICE</i>	103
6.2.3	Système à stéréovision	103
6.2.4	Le <i>CASBlIP</i>	103
6.3	Le traitement d'image pour les besoins des déficients visuels	104
6.3.1	La méthode de la transformation de Hough	104
6.3.2	Passage piéton par lignes de fuites	106
6.3.3	Méthodes de regroupement utilisant la géométrie projective	108
6.3.4	Les modèles déformables	112
6.3.5	Discussion	113
6.4	Les possibilités perceptives des non-voyants	114
6.4.1	Tests en situation	114
6.4.2	Les astuces du manuel de formation aux aides électroniques	115
6.4.3	Nouvelles astuces avec les nouveaux dispositifs	116
6.5	Conclusion	117
7	Conclusion générale	119
	Bibliographie	121
A	Code Mathematica	127
A.1	Code pour calculer le champ de protection	127
A.1.1	Panneau latéral	127
A.1.2	Passage étroit	127
A.1.3	Le code	127
	Table des figures	129
	Liste des tableaux	132

Remerciements

A l'issue de ce temps dense et précieux, passé au Laboratoire Aime Cotton, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à toutes les personnes qui ont permis la réalisation et l'aboutissement de cette thèse.

La première personne que je tiens à remercier est René Farcy, mon directeur de thèse, qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé. Nos discussions continuelles, si riches par la différence des méthodes de travail, ont sûrement été la clé de réussite de ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au directeur du Laboratoire Aimé Cotton, Pierre Pillet pour m'avoir accueilli.

Ma gratitude s'adresse également à Roger Leroux pour sa bonne humeur permanente et sa participation avec Roland Damaschini à la correction de ce manuscrit.

Je remercie M. Jean-Pierre Galoup, directeur du programme de coopération PREPA avec le Pérou, pour les réflexions, questions et conseils prodigués sur le manuscrit.

Je souhaitais adresser aussi mes remerciements les plus sincères à la personne qui m'a apporté son aide et qui a contribué indirectement à l'élaboration de ce mémoire : Emilie Dehoubert pour son soutien quasi inconditionnel, sa disposition, courage et patience dans les cours de français.

J'adresse mes remerciements, pour la sympathie qu'ils m'ont témoignée, à Aziz Zogghi, Amanda Trépagny, Bruno Vivian, Magali Tutou et Arnaud Recher.

J'exprime toute mon amitié à Henry Pezard de l'atelier de mécanique, et je le remercie pour l'aide apportée lors de la fabrication des pièces mécaniques prototypes.

Chapitre 1

Introduction générale

Ce travail de thèse s’inscrit dans le domaine des aides optroniques aux déplacements autonomes des déficients visuels. Traditionnellement les non-voyants utilisent la canne blanche longue ou le chien guide pour se déplacer. La canne blanche ne protège pas le non-voyant des obstacles en hauteur comme les arrières ou les rétroviseurs de camions, les branches inclinées, les panneaux publicitaires, etc. Elle ne lui fait éviter les autres obstacles que par le biais d’un contact mécanique de la canne lorsqu’il n’est plus qu’à quelques dizaines de centimètres de l’objet. Cette faible anticipation mène à des chocs corporels fréquents. La personne doit être constamment très tendue afin de pouvoir s’arrêter brutalement. L’équipe de recherche “Instrumentation pour le handicap” du Laboratoire Aimé Cotton travaille depuis 1993 sur des dispositifs optroniques se fixant sur la canne blanche et permettant au non-voyant de localiser le passage libre avec plusieurs mètres d’avance. Ainsi le passage peut être pris avec une anticipation et une fluidité comparable à celle d’un voyant ou d’un utilisateur de chien guide. Les dispositifs développés sont basés sur la télémétrie optique active : triangulation laser et proximétrie à LED infrarouges. Au début de cette thèse deux appareils sont diffusés auprès des non-voyants :

- le *Tom Pouce* qui est un proximètre infrarouge destiné aux débutants. Il a une faible résolution angulaire et en distance, et un retour vibrant
- le *Télé tact* qui est un télémètre à triangulation laser incluant un proximètre infrarouge avec un retour sonore ou vibrant.

De manière simplifiée, le *Tom pouce* a la réputation d’être assez facile à manier mais avec des possibilités limitées. Le *Télé tact* a peu de limitations mais demande beaucoup plus de concentration à l’utilisateur et d’investissement pour apprendre à s’en servir. L’aboutissement de ce travail est la mise au point d’un capteur amélioré offrant la “simplicité d’utilisation” du *Tom pouce* et permettant

les “mêmes possibilités en déambulation” que le *Téléact*.

Ce travail s’intègre dans une boucle complète comprenant du travail technologique, des modélisations pour optimiser les performances des capteurs et leur intégration dans des dispositifs effectifs utilisables par les non-voyants, des méthodes de mesure des performances globales des dispositifs, l’entrée du dispositif dans le protocole de rééducation et le retour utilisateur.

Dans le chapitre 2, nous présentons des données statistiques sur la cécité, sur le degré d’autonomie des déficients visuels dans les déplacements, sur la rééducation proposée aux non-voyants destinée à utiliser au mieux la canne blanche ou le chien guide. Nous faisons ensuite une bibliographie des propositions d’aides électroniques aux déplacements passées et présentes, ainsi que des méthodes d’évaluation de ces dispositifs. Nous terminons par un résumé des travaux faits sur le sujet au laboratoire Aimé Cotton de 1993 à 2007 ainsi que des axes d’améliorations souhaités.

Le chapitre 3 porte sur l’amélioration des capteurs infrarouges à LED utilisés pour la recherche de passages libres. Un calcul photométrique permettant d’optimiser les propriétés des capteurs est développé. Le calcul est validé expérimentalement. Les capteurs optimisés sont intégrés dans de nouveaux appareils industrialisés et mis à disposition des non-voyants (*Minitact*, *Tom Pouce II*).

Le chapitre 4 étudie un nouveau compromis de télémètre laser à triangulation destiné à remédier aux limitations du capteur infrarouge développé au chapitre 3. Le télémètre a été prototypé et testé. Il a atteint le gain souhaité de robustesse, compacité et sensibilité sur les surfaces non coopératives. Un dispositif intégrant ce télémètre et deux capteurs infrarouges a été prototypé dans l’objectif d’en faire une évolution du *Téléact* vers la version *Téléact III*.

Le chapitre 5 met au point des outils pour évaluer objectivement les performances d’un détecteur d’obstacle et mettre en évidence leurs limites. Ce type d’outil est destiné à être à la fois un outil interne pour améliorer les performances des capteurs, et un outil public pour donner aux utilisateurs des moyens supplémentaires d’évaluation du matériel proposé. Il servira également à conclure sur les propriétés du capteur final élaboré.

Enfin, le chapitre 6 analyse le problème des éléments de l’environnement qu’il est utile d’identifier (passage piéton, porte fermée par exemple) et dont l’absence de relief fait qu’ils ne sont pas perceptibles par télémétrie. Différentes voies sont analysées : capteurs d’images additionnels, fusion de données entre capteurs infrarouges et télémétrie laser. Des solutions implantables dans le *Téléact III* sont proposées.

Chapitre 2

État de l'art et besoins

2.1 La déficience visuelle

2.1.1 Classification et statistiques

Selon la définition internationale de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [1], le déficit visuel est segmenté en cinq catégories. On parle de cécité à partir de la catégorie trois. Ceci correspond à une acuité visuelle, avec correction portée, inférieure à 1/20 (Table. 2.1) ou à une perte de champ de vision inférieure à 10 degrés pour le meilleur œil.

Catégorie	Egale ou supérieur à :	Inférieur à :
0 : Déficience visuelle légère ou absente	3/10	
1 : Déficience visuelle modérée	1/10	3/10
2 : Déficience visuelle sévère	1/20	1/10
3 : Cécité modérée	1/50	1/20
4 : Cécité sévère	Perception lumineuse	1/50
5 : Cécité totale	Pas de perception lumineuse	

TABLE 2.1: Acuité visuelle de loin avec la "correction portée"

Dans le monde

D'après l'organisation mondiale de la santé (OMS), au niveau mondial en 2009, près de 314 millions de personnes sont atteintes de déficience visuelle. Les causes sont diverses. 45 millions sont aveugles. Plus de 85% des personnes atteintes de déficience visuelle vivent dans des pays à revenu faible ou intermédiaire. 39% des

cas de cécité sont dus à la cataracte liée à l'âge, principale cause. On estime à près de 1,4 million le nombre d'enfants aveugles de moins de 15 ans, Fig. 2.1.

En France

Selon l'enquête HID¹, on estime pour 2010 à environ 1 854 000 le nombre de personnes atteintes de déficits visuels en France [2] (soit 2,9% de la population) Fig. 2.2. Parmi ces déficients visuels, près de 612 000 personnes sont malvoyants légers (catégorie 0), avec une déficience visuelle et un champ visuel périphérique étroit mais sans incapacité visuelle sévère déclarée en vision centrale. Environ 1 016 000 personnes sont malvoyants moyens (catégorie 1) avec une incapacité visuelle sévère en vision de loin. 159 000 personnes sont malvoyants profonds (catégorie 2) ayant une vision résiduelle (limitée à la distinction de silhouettes). Enfin 66 700 personnes sont non-voyants (catégories 3, 4 et 5).

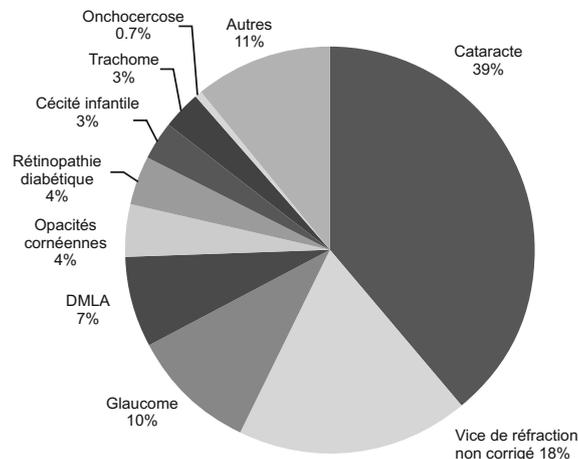


FIGURE 2.1: Causes mondiales de cécité

Une étude du ministère de la santé [3] a permis d'estimer le nombre de déficients visuels adultes dont l'autonomie est insuffisante pour se déplacer sur certains (ou tous les) trajets sans aide humaine. La moitié des déficients visuels, essentiellement de la catégorie 1 et une partie de la catégorie 2 peuvent se déplacer sur tous les itinéraires avec une gêne plus ou moins importante, il s'agit de gens n'ayant pas de canne blanche et une vue suffisante pour gérer, moyennant une attention plus soutenue, les obstacles courants. Cette population est gênée pour lire les plaques des noms de rues et les plans ce qui limite l'autonomie en lieux inconnus. 15% de la population a une autonomie partielle limitée à quelques trajets et 29% n'ont pas d'autonomie. La part des catégories 3, 4 et 5 est très importante parmi les 29% sans autonomie. On y trouve aussi des membres des catégories 1 et 2 souvent avec association à une maladie ou un âge élevé.

1. HID : Handicap - Incapacités - Dépendance.

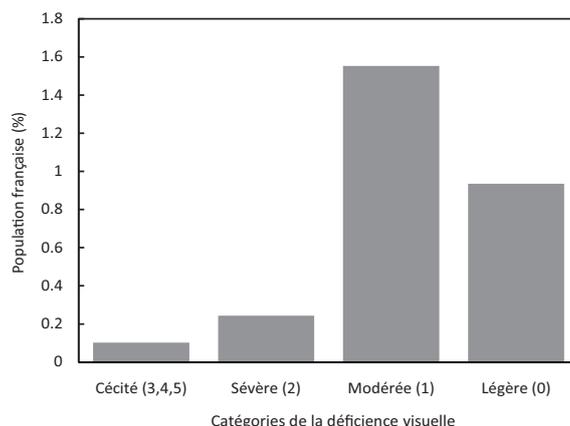


FIGURE 2.2: Personnes atteintes de déficits visuels

2.1.2 La locomotion

La locomotion est l'ensemble des connaissances et de la pratique qui permettent à un déficient visuel de se rendre d'un lieu à un autre en autonomie et en sécurité en compensant en partie son handicap par d'autres approches.

Nous allons détailler la locomotion à la canne blanche car c'est la base sur laquelle nous faisons reposer notre approche des aides électroniques. En ce qui concerne le chien guide, les pré-requis pour l'utiliser sont les mêmes que ceux demandés pour se déplacer à la canne. Les fédérations d'écoles de chiens guides estiment le nombre annuel de chiens remis en France entre 80 et 100. La durée moyenne d'exercice du chien est de 8 ans, ce qui permet d'évaluer le nombre d'utilisateurs à environ 800. Les techniques d'utilisation du chien ne seront pas développées ici.

La moitié des déficients visuels (catégories 1 à 5 confondues) ont peu ou pas d'autonomie dans les trajets. Pourquoi si peu de personnes autonomes dans les déplacements? Parmi les nombreuses et diverses raisons les plus courantes, certaines ne sont pas dues recours de la locomotion : l'état général de santé de la personne, l'enfermement de la personne par l'entourage qui la surprotège, un parti pris de la personne de cultiver la dépendance, le refus de rentrer dans un processus de rééducation, les états dépressifs non surmontés, etc. Il est par contre possible d'intervenir lorsqu'il s'agit d'une peur légitime de la personne devant le milieu extérieur devenu agressif. Souvent, les difficultés techniques et les chocs rencontrés font échouer les tentatives de déplacements, et empêchent le déficient visuel de progresser pour améliorer ses performances dans le déplacement autonome.

Si on se restreint à la population aveugle, c'est-à-dire aux catégories 3, 4 et 5, on estime à environ 5% les personnes aptes à se déplacer sans accompagnant voyant sur un trajet quotidien simple [2, 3]. Les aides traditionnelles pour y arriver

sont la canne blanche longue utilisée comme outil de mobilité (et non uniquement de signalétique) environ 4% et le chien guide environ 1%.

Se déplacer sans la vue en milieu urbain est une opération complexe non spontanée que l'enfant met plusieurs années à maîtriser. Pour un non voyant il s'agit d'une opération bien plus complexe et il ne peut y arriver qu'au prix d'un entraînement poussé [4]. Ceci se fait généralement par le biais d'une rééducation que l'on nomme "instruction en locomotion". Cette rééducation ou enseignement est délivré par des thérapeutes à l'origine psychomotriciens, ergothérapeutes ou éducateurs spécialisés qui font une spécialisation d'une année leur permettant de devenir "instructeur de locomotion". Les principales techniques de locomotion associées à l'utilisation d'une canne blanche longue ont été développées par Richard Hoover aux Etats-Unis entre 1935 et 1950 [5]. Une canne est dite longue lorsque tenue verticalement elle arrive au niveau du sternum de la personne. Ces techniques ont été introduites en France au début des années 1970 au centre de rééducation de Marly le Roi par le Dr Chambet [6].

Il ne s'agit pas seulement d'utiliser la canne longue pour se protéger des dénivelés au sol, mais de mettre en œuvre tous les sens et les stratégies spécifiques afin d'arriver à traverser les carrefours, utiliser les transports en commun, retrouver sa route, etc. Un apprentissage régulier et suivi contribue à ce que ces différents éléments s'associent pour amener peu à peu de l'autonomie dans la vie personnelle et sociale quotidienne. Il s'agit, en effet, non pas de connaître et de retenir quelques itinéraires déterminés, mais d'acquérir les moyens de maîtriser l'environnement et de transposer les connaissances acquises à des situations nouvelles [7].

La vision est certes le moyen le plus rapide et efficace pour appréhender notre environnement. Mais les autres sens nous permettent de compenser ce manque à condition d'être bien utilisés. L'audition permet de percevoir un bruit émis à distance, constituant ainsi un repère lorsque son origine est bien déterminée. Le bruit émis par une voiture qui se déplace informe de l'axe de la route. L'analyse des bruits de la circulation à un carrefour permet au déficient visuel de traverser en sécurité et de savoir quand le feu piéton est vert (par le démarrage des voitures roulant parallèlement à sa direction de traversée).

Le "sens des masses" ou écholocation est une perception de nature auditive qui permet de percevoir à courte distance les obstacles de volume important, avant d'être en contact avec eux : murs, camions, etc. C'est un sens inutilisé chez les personnes voyantes, mais spontané chez l'aveugle de naissance. Il peut être développé chez la personne qui a perdu la vue. Ce sens permet aux non-voyants qui le maîtrisent de percevoir un grand mur latéral, d'éviter un obstacle de masse importante (sauf s'il est recouvert d'une surface acoustiquement absorbante). Ce sens demande beaucoup d'attention et un milieu calme pour être utilisé efficacement.

Le sens kinesthésique ou proprioception (ainsi que la mémoire kinesthésique) est en général méconnu du voyant, car son geste est guidé par le contrôle visuel.

En développant la prise de conscience des mouvements du corps, il est possible d'avoir un meilleur contrôle de l'attitude corporelle et une plus grande précision et efficacité dans le geste. C'est ce sens qui aide à maintenir une marche en ligne droite à défaut de toute autre référence extérieure.

Le toucher peut aussi informer davantage sur l'environnement immédiat : apprendre à toucher légèrement pour une perception fine, promener la main sur une surface (maquette) et enregistrer mentalement des perceptions successives, afin de constituer la connaissance d'un tout. Le toucher avec la canne donnera des précisions sur le sol, permettra de prendre des repères, situera une bordure de trottoir.

L'odorat peut être développé comme moyen d'identification, mais les odeurs se propageant de façon diffuse n'apportent qu'une information imprécise en ce qui concerne l'endroit exact d'où elles proviennent.

La canne blanche est une signalétique, connue depuis plusieurs décennies, indispensable en extérieur pour la plupart des déficients visuels. La version longue¹ de la canne blanche est également un outil qui demande un apprentissage pour accéder à l'automatisation du geste. Elle assure une protection par rapport aux dénivelés, aux obstacles, dans les escaliers et marches isolées. De même, elle fournit des repères de textures au sol bien plus détaillés que ceux perçus par les pieds. Elle doit :

1. Être tenue au centre du corps.
2. Être balayée devant la personne de manière symétrique par rapport à son axe de marche.
3. L'amplitude du balayage doit correspondre à la largeur des épaules.
4. Le balayage doit être synchronisé avec la marche, lorsque le pied gauche part vers l'avant la canne part à droite, lorsque le pied droit part vers l'avant la canne part à gauche.
5. La main doit être bien solidaire du pommeau de la canne et la seule articulation entrant en jeu doit être le mouvement de flexion extension du poignet.

Les modèles de canne les plus diffusés sont pliables en aluminium ou en fibre de carbone et comportent un embout roulant facilitant le glissement au sol.

L'utilisation du potentiel cognitif (attention, mémoire, déduction logique) est importante dans l'analyse de l'environnement. Ces aptitudes vont permettre à la personne d'utiliser les informations multi sensorielles à bon escient, de développer son orientation et d'accéder à la représentation spatiale. Elle pourra ainsi analyser et identifier l'espace de façon fiable. Il est évident que l'existence d'une

1. La canne existe en version courte de signalétique et longue (introduite en 1960) servant à explorer le sol.

expérience visuelle antérieure facilite cette synthétisation, car elle constitue une base de références concrètes.

De nos jours, les déplacements au quotidien sont de plus en plus difficiles du fait d'un nombre important d'obstacles sur nos trottoirs, d'une circulation plus dense, d'une utilisation des transports en commun complexe et d'un incivisme grandissant. L'utilisation de la canne blanche protège le déficient visuel, mais l'oblige à aller en contact avec l'obstacle. Son déplacement est saccadé, heurté, voire arrêté. Il est donc difficile de trouver une trajectoire fluide. De même la canne ne peut pas détecter les obstacles suspendus à hauteur de la tête (hayons de camions, volets entrouverts, etc.)

S'il est difficile de connaître avec précision le nombre de non-voyants maîtrisant plus ou moins les techniques de locomotion, les flux de personnes faisant une rééducation peuvent être plus facilement approchés. Le nombre d'autodictactes ayant une maîtrise correcte de la locomotion est réduit et modifie peu le chiffre total des déficients visuels autonomes dans les déplacements. Il y a un peu plus d'une centaine d'instructeurs de locomotion en exercice en France. La plupart sont dans des structures pour enfants (plus de 70). Les autres s'occupent des adultes, pourtant largement majoritaires. De plus beaucoup de rééducateurs ne font de la locomotion qu'à temps partiel. La rééducation n'est accessible que dans les grandes villes : Paris, Lyon, Bordeaux, Montpellier, Lille, Toulouse... On voit depuis peu des ouvertures de structures dans des villes plus petites : Nantes, Caen, Orléans... Il y a deux centres de rééducation pour adultes avec internat : le *Centre Paris Sud*² en région parisienne et l'ARAMAV³ à Nîmes.

Un instructeur peut délivrer une vingtaine de rééducations en moyenne par an à temps plein donc le flux d'adultes recevant une rééducation est de l'ordre de 500 par an. Sachant qu'il y a près de 70 000 personnes en France en situation de cécité légale, il est impossible de couvrir les besoins. Ces derniers sont cependant limités par la demande, le nombre de déficients visuels souhaitant une autonomie dans les déplacements est limité pour les raisons que nous avons déjà évoquées : enfermement par la famille, peur, méconnaissance des possibilités offertes par la rééducation, etc.

Recevoir une rééducation à la locomotion ne signifie pas que l'on deviendra autonome. Si la personne ne pratique pas, on aura les mêmes pertes de "capacité" que pour l'apprentissage d'une langue étrangère. Si elle devient autonome, cela ne signifie pas non plus qu'elle le restera à vie, les connaissances et la pratique peuvent se perdre pour de multiples raisons.

2. Depuis le 1er juillet 2010, les activités de l'APAM (Association pour les Personnes Aveugles ou Malvoyantes) ont été transférées au sein du Centre Paris Sud.

3. Institut ARAMAV : Clinique de réadaptation et rééducation fonctionnelles pour déficients visuels.

2.2 Les aides électroniques au déplacement (ETAs)

Pour réaliser un trajet de manière autonome il faut être apte à se déplacer et à s'orienter. Nous allons préciser la distinction entre aide au déplacement et aide à l'orientation.

Une aide au déplacement sert à trouver et gérer le passage praticable sur sa route. La dénomination anglaise est *Travel Aid (TA)*. Une aide à l'orientation sert à trouver la route pertinente pour arriver à destination (en anglais *Orientation Aid, OA*). Les aides traditionnelles à l'orientation pour le déficient visuel sont :

- le trajet appris par cœur.
- la prise d'information auprès de passants (souvent aléatoire).
- le chemin par explication (première à droite, seconde à gauche, etc.).

Les EOA aides électroniques à l'orientation à base de GPS, elles ne seront pas abordées ici.

Les aides électroniques au déplacement des déficients visuels ou en anglais *Electronic Travel Aids (ETAs)* sont des appareils actifs qui émettent et reçoivent des ondes (électromagnétiques ou acoustiques) pour explorer l'environnement dans un certain périmètre, ou bien des récepteurs passifs captant la lumière renvoyée par les différents obstacles. Ils traitent l'information renvoyée par l'obstacle et fournissent à l'utilisateur une information sur la configuration des obstacles proches.

En 1986 le *National Research Council* des Etats-Unis [8] a publié des recommandations sur les informations que devraient donner les ETAs [9], et dont les plus importantes sont :

1. L'information sur la présence, la localisation, et de préférence la nature de l'obstacle devant l'utilisateur, du sol jusqu'au-dessus de la tête, et horizontalement avec une largeur suffisante pour couvrir tout le corps.
2. L'information sur le chemin ou la surface sur laquelle le piéton marche est hautement souhaitée : texture, gradients, marches montantes et descendantes, bordures à gauche et à droite.
3. L'information de la position et de la nature des objets à côté du chemin : bordures, barrières, passage des portes, arbres, etc.
4. L'information sur des points de référence à distance, information absolue ou relative par rapport à la direction de la marche.
5. L'information sur la localisation de points de repère ainsi que la capacité à identifier les caractéristiques spécifiques de l'environnement comme l'entrée de bâtiments, le numéro de chambre, l'ascenseur, la chambre de repos, le numéro d'étage, les intersections, etc.
6. L'information suffisante pour permettre à l'utilisateur de construire une carte mentale et se faire une image de la route à suivre.

Dans cette approche il est demandé à l'aide électronique de tout faire, y compris ce que fait déjà la canne (recommandation 2). Il n'est par ailleurs pas fait référence à une complémentarité avec le potentiel sensoriel non visuel de l'individu pour la prise d'informations.

Une différence d'approche sur l'information que doit recevoir l'utilisateur a souvent été soulignée entre L. Key concepteur du *Sonic Guide* et T. Heyes concepteur du *Pathfinder*. Ils utilisaient à la même époque une technologie voisine de capteur à ultrasons avec un port de tête, par contre la démarche de transfert d'information au non-voyant était très différente. Le premier cherchait à traiter au minimum le signal des capteurs pour en transmettre l'intégralité à l'utilisateur. L'autre par contre cherchait à avoir une information de sortie très simple en traitant au maximum le signal. Il donnait l'alerte d'un passage et non passage.

Beaucoup ont considéré que le problème des ETAs était essentiellement un problème d'interface avec les utilisateurs, les limitations des capteurs sont très rarement mentionnées.

De nombreux concepteurs pensent que leurs dispositifs peuvent s'utiliser spontanément par auto apprentissage [10]. D'autres ont dit que la technologie aujourd'hui devait être considérée comme suffisamment avancée pour aller vers la personne sans lui demander d'efforts d'adaptation et que la prise en main était immédiate [11]. Les appareils ont été distribués avec une notice d'utilisation signifiant le rôle des boutons, sans fournir de guide d'utilisation ni de prise en main.

Il existe par ailleurs de nombreux travaux sur des dispositifs à base de caméras et d'interfaces haptiques⁴ ou sonores permettant de représenter une information bidimensionnelle. La lecture des caractères ou la description de cartes géographiques est l'objectif principal de ces dispositifs [12]. Il n'y a pas de rapports d'utilisation en situation de déplacement de ce type d'approche. Cette thématique ne sera pas abordée ici.

Avant de décrire le travail déjà réalisé par l'équipe en 2007 à l'initiation de la thèse, nous allons reporter les tentatives faites par le passé en les classant par périodes et en résumant les informations disponibles dans la bibliographie.

2.3 Développements des ETAs

2.3.1 Avant 1970

Bien avant la standardisation de la canne blanche développée par Richard Hoover (à la fin des années 40), des efforts pour développer un système d'aide électronique à la mobilité des aveugles ont été déployés. On peut signaler que les premiers

4. L'haptique désigne la science du toucher, par analogie avec acoustique ou optique (provient du grec "aptomai" qui signifie "je touche"). Au sens strict, l'haptique englobe le toucher et les phénomènes kinesthésiques, c'est-à-dire la perception du corps dans l'environnement.

essais documentés remontent à l'année 1897 : Noiszewki pour l'*Elektroftalm* puis D'Albe pour l'*Exploring Optophone* en 1912 [13, 14]. Il reste peu d'informations sur ces systèmes qui étaient des détecteurs de lumière.

Durant la période 1940-1960 la recherche sur les aides électroniques au déplacement des non-voyants est bien établie et organisée aux Etats-Unis. Des efforts pour développer des systèmes électroniques ont été faits. Les centres de recherche impliqués ont été : *Haskins Laboratories*, *Stronberg Carlson*, *Brush Development Company*, *The Franklin Institute*, *United States Army Signal Corp*, la *National Academy of Science (NAS)* et le *National Research Council (NRC)*. Les financements ont été assurés par l'armée américaine et la *Veteran affairs Administration*. L'évaluation et les études de mobilité ont été faites au *Haskins Laboratories*. Finalement la construction des appareils se faisaient au *Naumberg and Radio Inventions* et à la *Radio Corporation of America (RCA)*.

La *Laser Cane* : Télémètre à triangulation

En 1945 Lawrence Cranberg [15] développa un télémètre optique pour la détection d'obstacles. Il employa le principe de triangulation avec la lumière d'une lampe incandescente, Fig. 2.3 (a). Ce détecteur d'obstacles a été considéré comme un appareil ingénieux et bien construit par rapport au standard de l'époque. En 1948, la *RCA Corporation* fit 25 appareils qui ont été appelés justement "Détecteur d'obstacles". Les évaluations des performances étaient faites par Thomas A. Benham, un physicien aveugle qui recommanda des changements importants. Après quelques modifications, en 1962 et 1963, la nouvelle version rebaptisée G-5 (Fig. 2.3 (b)) était prête à l'évaluation. Le résultat, l'appareil ne donnait pas d'informations utiles pour garantir la sécurité du non-voyant.

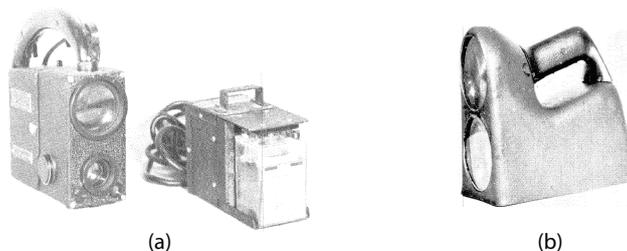
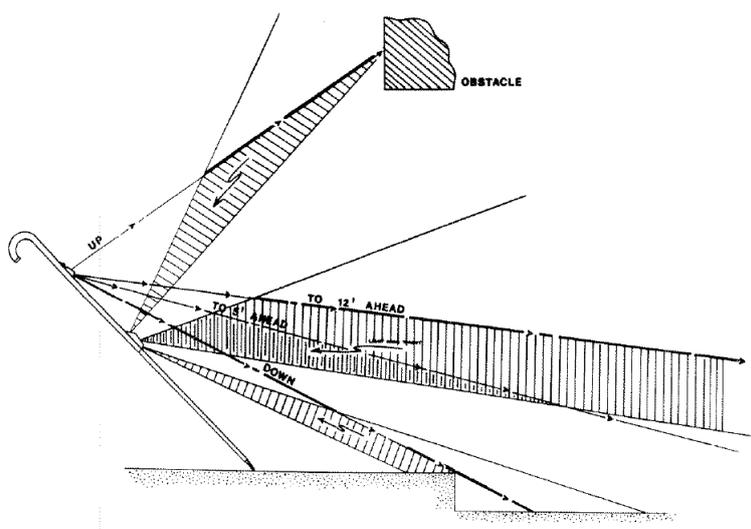


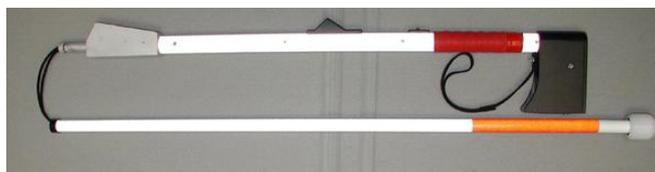
FIGURE 2.3: Détecteur d'obstacles : (a) première version (b) G-5

La seconde partie du développement commença en 1964 avec les récentes avancées technologiques de l'époque tels que l'apparition des batteries nickel-cadmium, le transistor maintenant disponible ainsi que la diode laser [16]. Premier résultat en 1966 avec le développement de la canne laser C-3 (*Laser Cane C-3*). Toute l'électronique était incorporée dans la poignée de la canne blanche. Suite à une évaluation du C-3 réalisée par cinquante aveugles, une nouvelle version améliorée

FIGURE 2.4: La *Laser Cane C-5*

était produite, la C-4. En 1971 un protocole pour l'évaluation était implémenté par le *National Research Council* [14, 17, 8].

Par la suite d'autres améliorations ont été faites sur la version C-5 (Fig. 2.4). 35 appareils sont sortis et ont été utilisés par des aveugles. La *Laser Cane C-5* était composée de trois faisceaux laser pulsés à sécurité oculaire de 905nm de longueur d'onde. Le principe de chaque capteur est la triangulation laser avec un ou deux récepteurs éloignés de 10 à 20 cm de l'émetteur laser permettant de découper un intervalle de distance en deux ou trois : le premier était incliné vers le sol et détectait des trous plus profonds que 6in (0,15m) à 6ft (1,82m) de distance devant l'utilisateur. Le deuxième laser était dirigé dans la direction de la marche avec des portées maximales de 5ft et 12ft (1,5 et 3,6m) qui étaient choisies par l'utilisateur. Le troisième laser détectait des obstacles au niveau de la tête (avec deux portées de 1,5ft et 2ft (0,6m)). En 1992, une nouvelle version était produite, la *laser cane N8* avec l'élimination du laser dirigé vers le sol. Sept ans après, une nouvelle modification de la canne laser a été implantée, appelée *Laser Cane N-2000*, Fig. 2.5, avec la réincorporation du laser vers le sol. L'information de la *Laser Cane N-2000* (420g) se faisait par bips sonores ou vibrations.

FIGURE 2.5: La *Laser Cane N-2000*

Suite aux années 1960, beaucoup de tentatives sont faites. Des dispositifs

passifs ont été produits comme les détecteurs de lumière [14], de couleur [18], d'image [19, 20]. D'autres systèmes de détection actifs capables d'émettre un signal électromagnétique ou acoustique en fonction d'un signal reflété ou rétrodiffusé ont été développés [21, 22, 17, 10, 23].

Parmi les développements initiés avant 1970, deux autres appareils ont pu franchir l'étape du prototype : le *Pathsounder* et le *Sonicguide*, qui sont des dispositifs à ultrasons. Ils ont été utilisés en programmes d'entraînements en situations réelles. Ces appareils ont eu comme la *Laser Cane* des successeurs ayant existé jusqu'à la fin des années 2000

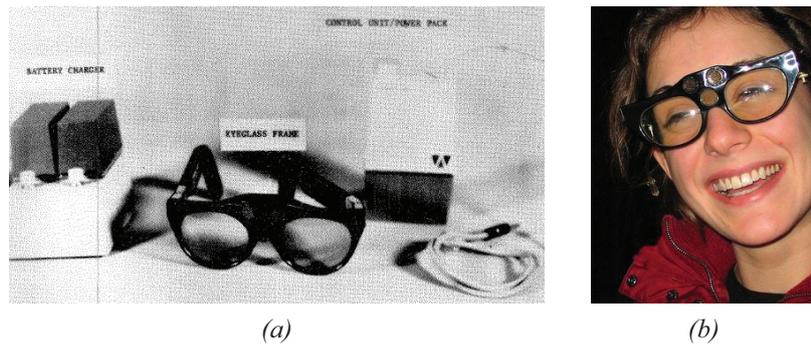
Le *Pathsounder* : Télémètre à ultrasons monofaisceau

Le *E Pathsounder* [15] a été conçu par Lindsay Russell en 1965 et évalué par ce dernier en 1969 [13]. Le *E pathsounder* a été pensé comme complément de la canne blanche et destiné à protéger la largeur du corps. L'utilisateur le portait sur la poitrine et était protégé des obstacles situés devant lui. Le *Pathsounder* émettait des impulsions d'ultrasons (15 par seconde) qui produisait un cône de protection de 50 à 60cm de diamètre à une distance de 180cm. L'alerte est donnée par vibration et son. Quelque temps après, il développa une version modifiée qui opérait de la même manière que le modèle E, mais était constituée de deux unités : un casque/oreillette et un boîtier de contrôle. L'émetteur et le détecteur d'ultrasons étaient implantés sur le casque. Ce modèle dénommé *SE Pathsounder* a été disponible en 1975.

Le *Sonicguide* : Télémètre à ultrasons multirécepteurs

Le *Sonicguide* [15] a été un appareil conçu par Leslie Key. Il a eu deux prédécesseurs : la *Sonic Torch* 1964 et le *Biaural Sensory Aid*. Le *Sonicguide* assurait la protection du corps depuis le genou jusqu'à la tête et se portait comme une paire de lunettes, Fig. 2.6. Il émettait un signal ultrasonore avec une divergence de 45 deg et donnait à l'utilisateur des informations sur son environnement : l'estimation de la distance, l'appréciation directionnelle et l'identification d'objets. L'interprétation des tons caractéristiques donnait la possibilité d'identifier des objets. Il détectait des obstacles entre 3,6m et 4,5m en surfaces diffuses et jusqu'à 6m en surfaces spéculaires. Lorsque l'utilisateur visait un obstacle comme un poteau fin, les échos étaient composés d'une seule fréquence, cependant les obstacles comme les branches d'un arbre produisaient des échos qui étaient composés de multiples fréquences. Les limitations citées furent un prix trop élevé, des perturbations par l'environnement : les panneaux à base de néons et des orages. Le *Sonicguide* a existé jusque dans les années 90.

Une version simplifiée appelée *Single Object Sensor* a été proposée pour les utilisateurs qui trouvaient le *Sonicguide* trop complexe. Avec un cône d'émission de 25° où la distance était codée par la fréquence de clicks (1000click/s pour 15cm

FIGURE 2.6: Le *Sonicguide*

et 30click/s pour 4,8m). Pendant les années suivantes l'appareil a été amélioré et s'est appelé le *Trisensor* (1990). Il n'est plus disponible à ce jour.

2.3.2 La période 1970-2000

Cette période s'est surtout concentrée sur les dispositifs à ultrasons mono et multifaisceaux. Dans la lignée du *Pathsounder*, mais tenu à la main au lieu d'être posé sur la poitrine, on peut citer le *Mowat Sensor*, Fig. 2.7. Cet appareil conçu par Geoff C. Mowat en 1970 [14] était doté d'un cône d'émission elliptique d'ultrasons (de 15° et 30° de divergence). Il s'utilisait à la main comme une torche et détectait les obstacles jusqu'à 1m ou 4m, selon le choix de l'utilisateur. Il était un des premiers à utiliser un codage d'alerte simple où la fréquence de vibration était inversement proportionnelle à la distance de l'obstacle (depuis 40 impulsions/s jusqu'à 10 impulsions/s). Il détectait et localisait les points de repère et les obstacles. Grâce aux dimensions du faisceau ultrasonore, l'appareil protégeait depuis le genou jusqu'à la tête.

FIGURE 2.7: Le *Mowat sensor*

Le *Nottingham Obstacle Detector (NOD)* développé par l'Université de Not-

tingham en 1974 est assez proche.

En 1983 Tony Heyes développa toujours dans l'université de Nottingham, le *Sonic Pathfinder* [14]. Il se portait à la tête (Fig. 2.8) et il avait le même type d'alerte que le NOD (sonore). Sa longue portée était de 2,7-3m (tons des hautes fréquences) et sa courte portée était de 0,75m (tons à basses fréquences) [24].



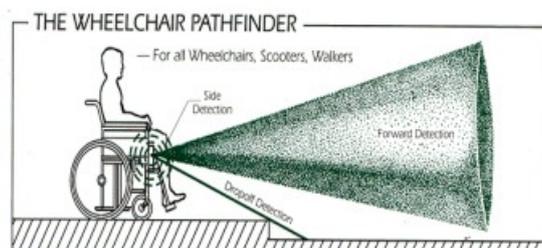
FIGURE 2.8: Le *Sonic Pathfinder*

Le *Sonic Pathfinder* donnait des informations du chemin dépourvu d'obstacles. Les signaux confus étaient interprétés et simplifiés par un microcontrôleur et ensuite envoyés à l'utilisateur. La portée était ajustée automatiquement selon la vitesse de marche. Un avertissement était donné sur l'existence d'un obstacle se trouvant à deux secondes de marche. L'alerte sonore et stéréo d'un seul ton permettait d'avertir si l'obstacle était à gauche ou droite. Cette méthode réduisait le temps d'entraînement. Le *Sonic Pathfinder* n'a plus été disponible à partir de la fin des années 1990.

Les autres dispositifs non fondamentalement différents des précédents comme le *Polaron*, le *Sensor 6* et le *Mini radar* ne sont pas décrits ici.

Une adaptation à la chaise roulante, le *Wheelchair Pathfinder* était un ETA développé par *Nurion Industries* [15] conçu pour la détection d'obstacles et s'utilisait sur une chaise roulante, Fig. 2.9. Le système était constitué de trois capteurs ultrasons. Un capteur émettait vers la direction de déplacement (portée de 1,2 ou 2,4m) et deux autres capteurs placés à gauche et à droite émettaient latéralement pour la protection latérale (30cm de portée). Un faisceau laser dirigé vers le sol était attaché à la chaise et il pouvait mesurer un trou plus profond que 5 cm situé à 1,2m devant la chaise.

Le *Wheelchair Pathfinder* était relativement facile à utiliser, il ne requérait pas l'utilisation de la main pour le manipuler, condition importante pour les personnes à limitation motrice. Citons également un projet resté à l'état de prototype réalisé par l'Université du Michigan. Cela commença par la *Navbelt* en 1989, (Fig. 2.10(b)), plusieurs détecteurs à ultrasons périphériques explorent l'espace dans un large champ. Suivirent une version pour chaise roulante (Fig. 2.10(a)) et finalement une ETA prototype constituée d'un système de détecteurs à ultrasons appelé *Guide cane* [22, 25, 26]. Dix détecteurs distribués sur un demi-cercle pro-

FIGURE 2.9: Le *Wheelchair Pathfinder*

tégeaient le corps dans un champ de 120°. Ceux-ci sont placés à 15cm du sol dans un boîtier monté sur roulettes. Le boîtier contenant son système d'asservissement de direction des roulettes doit être poussé à l'aide d'une canne et contournait automatiquement les obstacles. L'utilisateur devait suivre la direction de l'appareil, Fig. 2.10(c).



(a) Le Navchair (1991)



(b) Le Navbelt (1992)



(c) Le Guide Cane (1998)

FIGURE 2.10: Les systèmes de l'Université du Michigan

2.3.3 La période actuelle post 2000

Les projets

Nous ne décrivons pas les multiples projets où nous n'avons pas trouvé de preuves d'existence réelle : lunettes *Wufu*, la *virtual white cane* en 2005, Manduchi *et al.* [27] de l'Université de Californie, la canne *Mygo* [28], le *Tactile Wand* [29], le *Vision plus* [30], le radar optique [31], etc.

Le CASBlIP (*Cognitive Aid System for the Blind People*) [32] était un projet européen supporté principalement par l'Allemagne, l'Angleterre, l'Italie et l'Espagne, dont l'objectif était de développer un système de mobilité, pour aveugles et malvoyants destiné à représenter le monde réel à travers des images/cartes acous-

tiques. Deux versions ont été développées : les prototypes M1 et M2. La première version permettait de détecter des obstacles jusqu'à cinq mètres, et la deuxième jusqu'à quinze mètres. La technologie de base est une caméra linéaire à temps de vol de SIEMENS utilisant un capteur linéaire de 64 pixels. Le prototype est constitué : d'une lunette, d'une unité de traitement pour la caméra à temps de vol linéaire, d'un système à stéréovision traduisant l'espace en sons, d'un système inertiel et d'un GPS, Fig. 2.11.



FIGURE 2.11: Le système CASBlIP - M2

L'information finale était synthétisée par une carte acoustique intégrant le système à stéréovision et le capteur linéaire à temps de vol. Le système à temps de vol balayait un faisceau laser sur 64 points en ligne horizontale dans un angle de 60 degrés. La distance maximale détectée était de 5m pour une cadence de 25 balayages (64 pixels) par seconde, le système était incorporé sur la lunette. La génération d'un plan acoustique est aussi générée à partir du système à stéréovision où l'unité de contrôle traitait l'information de profondeur de la caméra pour obtenir l'information utile et compléter le capteur linéaire. Une des fonctions du système était assignée à la prise en compte du signal d'augmentation EGNOS⁵ sur le positionnement global pour améliorer la précision du signal GPS. Le système inertiel (placé sur la tête) déterminait la position, la vitesse et l'accélération. Un gyroscope permettait de compenser les mouvements de la tête et l'information du détecteur selon la direction des objets situés devant l'utilisateur. Les informations d'alarme indiquaient la distance et la largeur de l'obstacle. Le test du prototype auprès de 3 personnes a été reporté en tant que conclusion du projet européen qui n'a pas eu de suite pour l'instant.

Un challenge de la Fédération Nationale des Aveugles des Etats-Unis (NFB en anglais) a été lancé en 2007 aux universités américaines pour développer une voiture qui soit conduite par un non-voyant. L'université VirginiaTech à travers son Laboratoire de Robotiques et Mécanismes (RoMeLa) a accepté de relever ce défi. En 2009 un buggy avec l'interface pour les non-voyants fut présenté,

5. EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service

Fig. 2.12(a) [33]. L'interface est constituée de trois éléments essentiels pour définir : la vitesse fournie par des vibrateurs implantés dans la ceinture de sécurité, la direction fournie par un gant avec des moteurs attachés sur chaque doigt et la carte de l'environnement donnée par une interface d'air. Un télémètre laser (Fig. 2.12(b)) qui balaye l'environnement est utilisé pour trouver des obstacles devant la voiture. L'équipe prétend avoir une voiture opérationnelle avec la mise au point de toutes les interfaces pour juillet 2011.

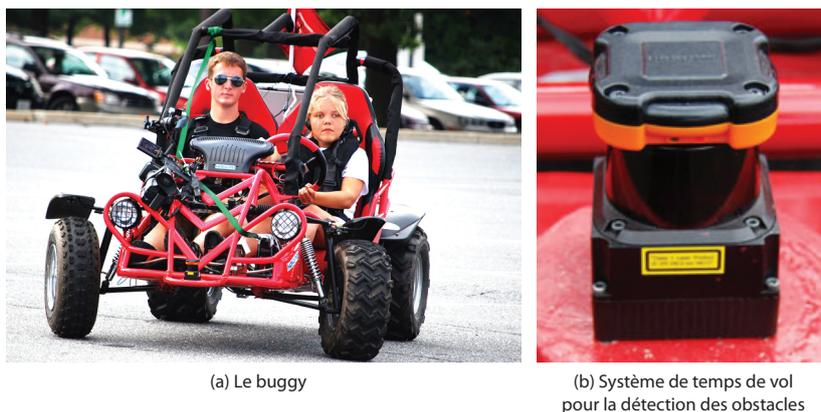


FIGURE 2.12: La première voiture conduite par des aveugles

Les appareils

Pour réaliser cette liste, nous nous sommes présentés en tant qu'acheteur déficient visuel. Nous avons consulté internet et les distributeurs français, anglais, allemands, américains et polonais. Nous classons ici les appareils par disponibilité, car nous en utiliserons certains au chapitre 5 pour effectuer des mesures sur les capteurs face aux obstacles courants.

Les appareils que nous n'avons pas réussi à nous procurer :

L'*Ultracane* a été développé en 2004 [34] par une équipe de l'Université de Leeds et une société privée : *Sound Foresight Ltd.* [35] (Fig. 2.13). L'appareil a un système de détection à ultrason incorporé sur la canne blanche. Il a un faisceau ultrasonore qui protège des obstacles à hauteur de la tête et un autre faisceau qui détecte des obstacles devant l'utilisateur. L'alerte se fait par vibration par intermédiaire de petits boutons incorporés sur l'appareil [36].

Des approches similaires ont été faites en Corée : Le *iSonic Cane* [37] développé par une société Coréenne appelée *Primpo* et en Russie : le *Sonar-1UT* a été développé par le Dr. S. O. Erchov [38] au sein de la *Scientific-Manufacturing Organization Sonar*. Enfin, citons aussi le *Ray* qui a été développé par la société autrichienne *Caretec* [39].

FIGURE 2.13: L' *Ultracane*FIGURE 2.14: L' *iSonic Cane*FIGURE 2.15: Le *Sonar-1UT*

Les appareils que nous avons pu acheter : ⁶

Le *K Sonar* :

En 2003 L. Key développa le successeur de la *Sonic Torch* de 1964, le *K Sonar*, Fig. 2.16 [10]. Les améliorations incorporées ont été sa miniaturisation et son adaptation sur la canne blanche.

Le *K sonar* est la version actuelle de 2010. Le signal d'alerte est sonore avec la fréquence du son proportionnelle à la distance (la haute fréquence correspond aux distances longues et les basses aux courtes). Comme pour son prédécesseur, le *Sonicguide*, le *K sonar* peut donner la caractéristique des obstacles en interprétant le signal par ses harmoniques et l'amplitude. Il a deux portées : 2m et 5m.

6. Tous ces appareils ont été livrés avec une notice expliquant le fonctionnement des boutons et les réglages des différents modes, il n'y a pas eu de conseils d'utilisation fournis, ni de méthode d'apprentissage.

FIGURE 2.16: Le *K sonar*

L'Ultra Body Guard (UBG) :

L'UBG est un appareil à ultrasons conçu pour la protection de la tête [40], Fig. 2.17. Il se porte sur la poitrine ou à la main avec les retours en vibration et vocal. L'UBG a deux portées, 1,9m et 3m. Il comprend d'autres fonctions comme : un podomètre, un guide vers une source de lumière et un compas.

FIGURE 2.17: L'*Ultra Body Guard*

Le Miniguide :

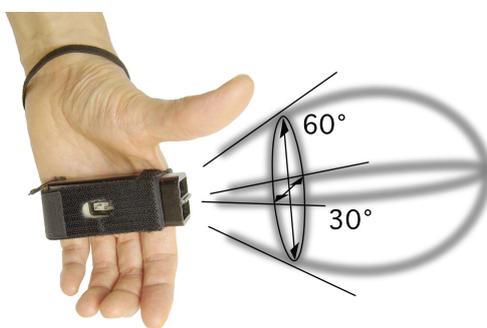
Le *Miniguide* de *GDP Research* (Australie) est un appareil à ultrasons mis sur le marché en 2000 [41] qui s'utilise à la main. Le non-voyant peut choisir une des cinq portées : 0,5, 1, 2, 4 et 8m. En 2005 la deuxième version était disponible, Fig. 2.18. L'alerte du *Miniguide* se fait par sons et/ou vibrations : il envoie des pulses de vibration avec une fréquence croissante au fur et à mesure que les obstacles s'approchent (même codage que le *Mowat Sensor*).

Le Palmsonar :

Un des plus récents développements commerciaux d'aides aux déplacements est le *Palmsonar* [23]. C'est le détecteur d'obstacles à ultrasons le plus petit qui existe sur le marché, Fig. 2.19. Il a un cône d'émission étroit horizontalement et large verticalement qui permet d'avoir une protection optimale du corps. Le co-

FIGURE 2.18: Le *Miniguide*

dage de l'alerte est traduit par vibrations. La fréquence de vibration s'incrémente en fonction de la distance. Il a sept portées : 0,3, 0,5, 1, 1,2, 1,4, 2 et 4m.

FIGURE 2.19: Le *Palmsonar*

Le *Laser Long Cane* :

Le *Laser Long Cane* [42] était conçu exclusivement pour la protection de la tête. Le boîtier pèse 355g, attaché près de la poignée de la canne, émet un faisceau laser à 45 deg de l'horizontale et détecte des obstacles jusqu'à 1,4m, Fig. 2.20. L'alerte est donnée par vibrations.

Récapitulatif

La Table 2.2 résume sommairement les données recueillies. Nous ne prétendons pas avoir localisé tous les appareils, ni trouvé tous les détails sur ceux localisés.

2.4 L'évaluation des appareils

L'évaluation de la performance du couple appareil - utilisateur fait appel à différentes disciplines : analyse des capacités de détection du dispositif, analyse de la qualité du déplacement de l'utilisateur, enquête sur son ressenti, etc. Les évaluations ne sont pas faites en général par le fabricant. Ce dernier fournit une notice

Description	Constructeur	Pays	Année	Protection	Portée (m)	Alerte	Utilisation	Principe
ETA's Pathsonder	SAEDC	Etats-Unis	1969	-	0,81, 1,82	vibration son	poitrine	ultrasons
Sonic Torch	SAEDC	New Zealand	1970	devant	2,1, 6	son	main	ultrasons
Sonicguide	Canterbury Univ.	New Zealand	~1970	corps	3,6, 4,5	son	lunettes	ultrasons
Mowat Sensor	Wormald Int. Sensory	New Zealand	-	-	1, 4	vibration, son	main	ultrasons
Nott. Obst. Detector	Nottingham Univ.	England	1973	-	2,1	son	main	ultrasons
Polaron	Nurion Industries	-	1980	corps	1,2, 2,4, 4,9	vibration, son	main, poitrine	ultrasons
Sensory 6	Brytech	Canada	-	devant, tête	2, 3,5	son	lunettes	ultrasons
The Trisensor	Canterbury Univ.	New Zealand	1983	corps	3,6, 4,5	son	lunettes	ultrasons
Wheelchair Pathfinder	Nurion Industries	-	-	devant	1,2, 2,4	-	-	ultrasons
				côté	0,3	-	-	ultrasons
				drop off	1,2	-	-	laser
The Sonic Pathfinder	Nottingham Univ.	England	1983	tête, devant	auto	son	tête	ultrasons
Ultra Body Guard	RTB GmbH & Co. KG	Allemagne	~1987	corps, tête	1,9, 3	vibration, voix	poitrine	ultrasons
Laser cane	Nurion	États-Unis	1992	devant	1,3, 3,6	vibration	canne	laser
Walkmate	Tech International	-	1993	devant	1,22, 2,13	vibration, son	ceinture, main	ultrasons
Tom Pouce	Lab. Aimé Cotton	France	1998	devant	1, 1,5, 4	vibration	canne blanche	faisc. infr.
Miniguide	GDP Research	Australie	2000	devant	0,5, 1, 2, 4, 8	vibration	main	ultrasons
Mini-radar	BestPluton	France	2001	devant	1,5	voix	main	ultrasons
K sonar	Bay Advanced Tech.	New Zealand	2003	devant	3,5, 5	son	canne	ultrason
Ultracane	Leeds Univ.	England	2005	devant	2, 4	vibration	canne blanche	ultrasons
Palmsonar	Takes Corporation	Japan	~2007	devant	0,3, 0,5, 1, 1,2, 1,4, 2, 4	vibration	main	ultrason
Vistac	University Mainz	Allemagne	2007	tête	1,4	vibration	canne	laser
Sonar 1UT	Scientific Manufacturing	Russie	-	devant	1 - 7	son	canne	ultrasons
Sonar-5UF-V4	Scientific Manufacturing	Russie	-	tête	1 - 7	son	main/poitrine	laser
The Ray	Caretec	Autriche	-	devant	2,85	vibration/son	main	ultrason
iSonic Cane	PRiMPO	Corée	2010	devant	2	vibration	canne	ultrason
Minitact	Lab. Aimé Cotton	France	2008	devant	1,5, 3,2	vibration	main	faisc. infr.

TABLE 2.2: Tableau recensant les différents appareils

FIGURE 2.20: Le *Laser Long Canne (Vistac)*

d'utilisation comportant comme informations techniques les différentes portées disponibles (sans spécifier le type d'obstacle) et parfois l'angle de divergence du faisceau (optique ou à ultrasons). Ces informations ne sont pas suffisantes pour évaluer la performance de l'appareil ni le service rendu effectif à l'utilisateur.

Un utilisateur recherchant une ETA ne trouvera pas facilement une information allant au-delà de celle de la table 2.2.

Dans la littérature les articles traitant des techniques d'évaluation des ETA sont peu nombreux. Nous avons repéré deux types de procédures : celles faisant appel à une observation de l'utilisateur et celles faisant appel à son ressenti subjectif. Nous n'avons pas trouvé d'articles consistant à mesurer les performances intrinsèques des capteurs.

2.4.1 Tests d'évaluation basés sur l'observation de l'utilisateur

Les tests avec utilisateurs voyants sur trajet artificiel

Cette technique argumente que le fait de faire appel à des voyants les yeux bandés élimine le facteur expérience et compétence acquise dans le déplacement d'un non-voyant [36]. Elle permet de fournir exactement la même quantité de formation et de pratique à chaque personne. Cette technique a également l'avantage de pouvoir être utilisée sur des appareils n'ayant pas ou pas encore passé par la barrière de l'utilisation réelle. Cinq étudiants ont reçu une semaine de cours de locomotion sous bandeau et deux jours et demi d'entraînement à l'*Ultracane*. Une route piétonne a été aménagée avec des obstacles que pouvait détecter l'appareil et les testeurs faisaient l'aller à la canne et le retour à l'*Ultracane*. Une augmentation du nombre d'obstacles perçus et une réduction des collisions ont été observées.

Evaluation avec des voyants sur trajet réel

Une étude faite par Steven La Grow [24] montre une évaluation sur un trajet réel : deux non-voyants ont reçu environ trois heures de formation pour l'utilisation du *Sonic Pathfinder* et sont conviés à faire plusieurs fois le tour de deux pâtés de maisons avec et sans l'appareil. Des observateurs mesurent la vitesse du trajet et notent des différences de comportement (trajectoire, chocs, hésitations...). Peu de différences ont été notées, et le peu de sujets et trajets ne permettaient pas de dresser une statistique.

2.4.2 Tests subjectifs sur le ressenti utilisateur

Le principe est de contacter par téléphone une liste de personnes équipées des dispositifs et de poser une série de questions du type : quand avez-vous utilisé l'aide la dernière fois ? Qu'elle est votre fréquence d'utilisation de l'ETA ? Sur quel type de trajet l'utilisez-vous ? Si vous ne l'utilisez plus pourquoi ? Quel âge avez-vous ? Quels sont vos déplacements habituels, occasionnels ? Quelle est le reste visuel éventuel ? etc.

Il y a deux études de ce type, liées toutes les deux à un programme d'équipement aux aides électroniques par la *Veteran Affairs Administration* aux Etats-Unis. La première en 1977 [43] concerne 18 personnes avec 12 personnes équipées au *Sonicguide* et 6 à la *Laser Cane*. La seconde a été réalisée en 1989 [44] et porte sur 298 personnes. Les retours ont été uniquement basés sur les réponses des utilisateurs sans analyse objective directe de la qualité du déplacement. Reprenons les résultats de la seconde étude, la plus récente connue de ce type bien que datant de 20 ans. Ils ont trouvé que parmi les 298 sujets questionnés, 140 avaient utilisé leur aide dans les 30 derniers jours avant l'entretien et que 62 l'avaient toujours avec eux. La moitié dit l'utiliser continûment quand ils l'ont avec eux et les autres de manière sélective selon les besoins. En général ils disent pouvoir se déplacer plus rapidement avec une plus grande aptitude à détecter ou éviter les obstacles sur le passage. Au moment de l'étude, 39% utilisaient le *Mowat Sensor*, 24% la *Laser Cane*, 34% le *Sonicguide*, et 3% le *Sonic Pathfinder*. D'autres auteurs comme Brabyn [45], citent cette étude pour faire remarquer que les aides électroniques étaient plus utilisées que ce qui était couramment admis.

2.5 L'approche de l'équipe et la situation en 2007

Pour les appareils développés au Laboratoire Aimé Cotton nous avons adopté la démarche suivante :

- Une ETA doit fournir une perception utile de l'espace complétant aussi bien les sens naturels du non-voyant que l'outil traditionnel à savoir la canne blanche.

- La propriété fondamentale de l'ETA est de permettre au non-voyant de mieux se déplacer, c'est-à-dire plus confortablement et plus efficacement avec une moindre fatigue.
- L'ETA doit prendre en compte l'ensemble des techniques de locomotion et ne pas chercher à mal faire ce que les sens naturels non visuels font bien, ou chercher à prendre le dessus sur la cognition et la volonté de l'utilisateur.
- L'ETA est une perception supplémentaire qui doit trouver sa juste place dans la hiérarchisation de l'ensemble des informations utiles au déplacement, pour y arriver correctement, il faut une formation structurée et conséquente.
- Faire une ETA avec la technologie actuelle qui reste primitive au regard des possibilités sensorielles même incomplètes, doit s'aborder en s'attaquant simultanément à la qualité des capteurs, à l'interface, à l'ergonomie, à la formation individualisée associée et au suivi de l'utilisation.
- L'ETA ne doit pas à terme ralentir l'utilisateur dans sa déambulation et doit fournir un taux très faible de faux positifs (information incitant l'utilisateur à modifier sa trajectoire sans raison valable).

2.5.1 Chronologie des technologies et appareils développés

Deux approches sont utilisées pour les appareils : la télémétrie laser à triangulation et la proximétrie infrarouge. La première consiste à mesurer une distance dans l'axe d'un faisceau laser et la seconde à évaluer l'existence d'un passage libre. Les appareils sont tenus à la main ou fixés à la canne et donc pointés dans la direction voulue par l'utilisateur. Le mouvement de pointage du poignet est de flexion - extension. La direction de pointage est perçue par proprioception⁷ et l'appareil fournit la profondeur sur son axe de pointage. La perception de l'environnement est une combinaison de la proprioception fournissant la direction de pointage et de l'information en profondeur fournie par l'appareil. Ceci donne un profil en profondeur de l'environnement en balayant. L'utilisateur fait une interprétation en faisant une synthèse de cette information avec sa connaissance du contexte, son expérience de situations similaires, les indices sonores, podotactiles, etc.

La télémétrie laser à triangulation

Le principe de base que nous utilisons est le suivant : une diode laser continue envoie un faisceau qui rencontre l'obstacle au point A (Fig. 2.21). L'obstacle rétrodiffuse la lumière, une lentille collecte une partie du flux lumineux renvoyé et fait l'image A' de A sur un détecteur de position linéaire. La position du centre de A' sur la barrette permet de remonter à la distance D .

Habituellement cette technique est utilisée en métrologie industrielle pour analyser des variations de distances submillimétriques à des distances inférieure au

7. La proprioception est la conscience interne de la position des membres de son corps.

mètre. Plus la distance est grande, moins la mesure est précise. La précision dépend directement des dimensions du capteur (plus B et f sont grands plus la mesure est précise). La puissance du faisceau laser est en général de 1mW (classe II). Nous avons développé une variante compacte à résolution faible mais d'une dizaine de mètres de portée et résistant à la lumière solaire en mesures mono coup.

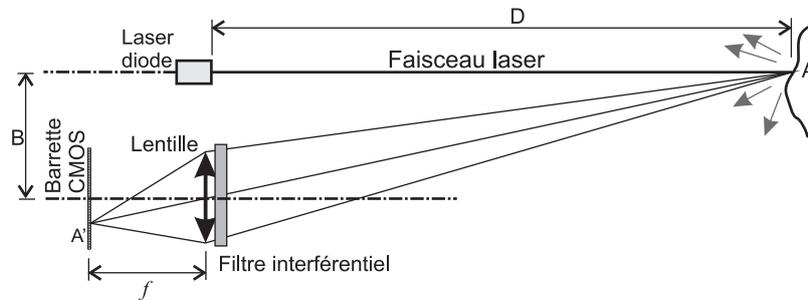


FIGURE 2.21: Diagramme de la triangulation laser

Comparaison avec la technique de triangulation utilisée et celle de la *Laser Cane*
 Les principales différences entre la technique de triangulation que nous utilisons et celle de la *Laser Cane* sont les suivantes :

- Nous utilisons une émission laser continue contre une émission pulsée pour la *Laser Cane*. L'avantage d'une émission pulsée est de pouvoir s'immuniser plus facilement de la lumière du jour. Par contre il est plus difficile d'avoir une bonne résolution en distance et d'avoir une mesure quasi continue dans le temps.
- Notre récepteur contient plusieurs centaines de cellules juxtaposées de quelques micromètres de diamètre contre une ou deux cellules de dimensions millimétriques espacées d'une ou deux dizaines de centimètres. Cela à l'avantage de permettre une haute résolution en distance et de rendre compact l'ensemble émetteur-récepteur.
- La *Laser Cane* explore jusqu'à 3,6m dans le plan horizontal avec deux intervalles de distance. La base du capteur est d'une vingtaine de centimètres. Le principe de triangulation permet de couvrir l'intervalle de distance de 20 cm à 15m avec une centaine d'intervalles, les dimensions mécaniques du télémètre sont inférieures à 10 cm^3 .

Le *Téléact I*, 1998

Le premier modèle, à disposition des non-voyants, est sorti en 1998 après 7 années de prototypage. Sa portée va de 20cm à 10 mètres. L'interface est sonore, elle comporte 32 notes musicales de la gamme de *do* majeur allant de 65 Hz à 1975 Hz. Un son d'instrument musical différent est utilisé pour chaque octave pour

mieux les séparer. Plus la plage de distance est courte, plus la durée totale des notes de l'instrument utilisé est courte. Plus la distance est courte, plus la note est également aigüe. Les intervalles sont de 0 à 40 cm (une note de percussion de 50ms qui se répète tant que l'obstacle est devant), 40cm à 1,5 mètre (7 notes de piccolo, intervalle de répétition 50ms), 1,5m à 3,5 mètres (7 notes de clarinette de 70ms d'intervalle de répétition), 3 à 6 mètres (7 notes clarinette de 70ms d'intervalle de répétition), 6 à 12 mètres (7 notes de flûte de 90ms d'intervalle de répétition), au-delà de 12 mètres (3 notes de flûte de 200ms d'intervalle). Après plusieurs échecs chez les premiers utilisateurs, une méthode d'utilisation en locomotion fut élaborée. Elle permit d'obtenir chez des utilisateurs particulièrement habiles des performances en fluidité dans des lieux encombrés allant au-delà de ce qui était considéré possible par les rééducateurs dans le domaine de la locomotion des non-voyants [46].



FIGURE 2.22: Le *Télé tact I*

Le *Télé tact I* présentait cependant quelques inconvénients importants :

- l'absence de mesure entre 0 et 20 cm, ce qui au démarrage pouvait faire confondre un obstacle très proche et un passage.
- son poids conséquent (420 g) et son encombrement qui rendait difficile sa fixation à la canne et occupait l'autre main.
- son parasitage fréquent les jours de fort soleil qui introduit des fausses alertes situées aux courtes distances.

La proximétrie infrarouge

Pour résoudre les problèmes de détection de la triangulation laser (*Télé tact I*) un dispositif complémentaire à LED infrarouge, appelé proximètre, fut ajouté. Le système infrarouge détecte à partir de 0 cm et couvre la zone de non détection (0-20cm) du télémètre laser. De plus la redondance de la détection d'obstacles à courte distance permet d'éliminer les fausses alarmes en plein soleil du télémètre laser.

Dans la Fig. 2.23 une LED dans l'infrarouge proche émet des impulsions de lumière de puissance croissante. Un photorécepteur collecte une partie du flux

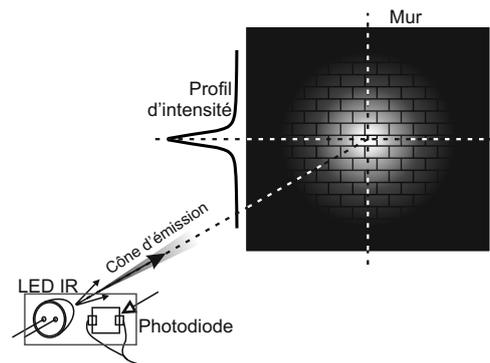


FIGURE 2.23: Principe du proximètre à infrarouge

rétrodiffusé par l'obstacle, l'électronique du récepteur change d'état lorsqu'un seuil de puissance lumineuse est atteint. La puissance émise par la LED au moment du changement d'état du récepteur donne une estimation de la distance à l'obstacle. Ce type de dispositif est peu sensible à la lumière du jour puisqu'il utilise une lumière pulsée. Par contre s'il peut donner une bonne précision de la distance pour un obstacle d'albédo et taille fixés, il sous estime la distance des obstacles noirs et fins et surestime celle des panneaux cataphotes coopératifs.

Le *Téléact II*

Le *Téléact II* (2.24) sorti en 2002 incorpore le télémètre laser à triangulation pour la détection d'obstacles dans l'intervalle 0,8m-12m et la proxémie infrarouge pour l'intervalle 0-0,8m et la hauteur.

Le capteur infrarouge, en plus de résoudre les problèmes du parasitage en plein soleil à courtes distances, apporte d'autres avantages grâce à son champ plus large : pour les voitures noires brillantes abordées de manière oblique où le laser se réfléchit totalement sur les portières, le proximètre infrarouge a généralement un phare dans son champ ce qui permet la détection. Si une vitre comprend une étiquette ou un marquage de sécurité pour le voyant, il est capté par le proximètre infrarouge alors que le faisceau du télémètre laser peut passer à côté et traverser la vitre.

La tenue de la canne d'une main et l'appareil de l'autre pose des difficultés de coordination des mouvements et occupe les deux mains. De plus le maintien horizontal de l'appareil n'est pas évident. L'appareil est donc fixé à la canne (poids 180 g), il balaie l'espace dans un plan horizontal, la direction du balayage est perçue par la direction du poignet. La personne perçoit ainsi, grâce à la ligne musicale, le profil de l'obstacle dans un plan horizontal situé à un mètre du sol.

Portées et limites d'utilisation du *Téléact II* :

- Portée de 12m à l'obscurité jusqu'à 20klux de lumière ambiante, la portée se réduit progressivement pour tomber à 7m sous 100klux de lumière

FIGURE 2.24: Le *Télétact II*

ambiante⁸.

- Non détection des vitres propres sous incidence fortement oblique ou des surfaces foncées métallisées.

Comparaison de la détection en hauteur du *Télétact II* avec celle du dispositif *Vistac* : Le *Vistac* est l'autre appareil (en plus de la *Laser Cane*) employant une technologie optique, il emploie une télémétrie à temps de vol utilisant un faisceau laser divergent. Le faisceau est orienté à 45° vers le haut et porte jusqu'à 1,4m. Il sert uniquement à la protection de la tête et n'anticipe pas les obstacles horizontaux par rapport à la canne. La protection de la tête grâce au *Vistac* est plus performante que celle du *Télétact II* sur les obstacles foncés et fins. Ce qui est le point faible de la proximité infrarouge. Par contre, bien que ne pesant que 320g, le volume du *Vistac* est le double de celui du *Télétact II* qui ne pèse que 180g pour juste la fonction en hauteur. La fonction hauteur du *Télétact II* occupe moins de 2 cm³ dans l'appareil, pèse 8g et consomme 50 fois moins.

Le *Tom Pouce I*

Nous avons réalisé que le proximètre infrarouge seul pouvait être un détecteur de passage relativement efficace malgré ses défauts, ce qui donna comme appareil le dénommé *Tom Pouce I* (Fig. 2.25). Son retour est vibrant en tout ou rien car il n'y a pas de gradation dans la vibration.

Caractéristiques et limites d'utilisation du *Tom Pouce I* [47] :

- Le *Tom Pouce I* a l'avantage d'effectuer une perception globale du passage libre et évite son "analyse détaillée". Il a trois portées : 0,8m, 1,5m et 3m qui peuvent être sélectionné manuellement par l'utilisateur.
- Les poteaux fins noirs brillants anti stationnement ne sont pas détectés avant la canne. Les panneaux de circulation catadioptriques rendent le passage

8. La lumière ambiante en plein soleil peut varier entre 50klux et 100klux.

FIGURE 2.25: Le *Tom Pouce I*

parfois non détectable à tort. A 3m de distance les passages aussi étroits que la largeur des épaules ne sont pas en général détectés.

2.5.2 La pratique des dispositifs

La formation des non-voyants

Les appareils ne peuvent être mis à disposition qu'après une formation. En effet nous avons vite réalisé que sans compléments de locomotion structurés l'échec est garanti à plus de 95% quelles que soient les performances intrinsèques de l'appareil. Percevoir à distance de manière artificielle demande de l'entraînement, une culture et un savoir faire. Le processus se fait en plusieurs étapes : il commence par une évaluation des techniques de base de locomotion à la canne qui prend environ deux heures. A l'issue de cette évaluation, soit la personne est acceptée pour une formation aux dispositifs, soit elle est réorientée vers une rééducation de base.

Le premier cycle de formation se fait généralement sous forme d'un stage intensif d'une semaine. La personne pratique ensuite deux à trois mois dans son quotidien. Un second cycle d'une semaine intensive est alors entrepris. Un suivi un an plus tard de deux heures, puis tous les deux ans est en général utile pour éviter la prise de mauvaises habitudes. Ces formations sont effectuées par des instructeurs de locomotion qui ont reçu deux semaines de formation continue à ces dispositifs.

L'appareil n'apporte un plus que dans le cadre d'une synthèse multisensorielle. En effet dans un centre commercial, le dispositif détectera de la même façon une ouverture de magasin qu'une allée. Ce sont les autres informations (texture du sol différentes à l'entrée du magasin, direction du flux principal de personnes, ambiance sonore) qui permettront de choisir le bon passage. C'est à l'instructeur de locomotion de mettre en place ce type de synthèse chez le déficient visuel et de lui faire rencontrer un certain nombre de situations pour qu'il ait un bagage suffisant pour traiter les situations inconnues.

En 2007 parmi les personnes se présentant, 70% sont acceptés en formation. Le taux annuel de formation est d'une centaine de personnes. Il y a de l'ordre de 15% d'échecs au cours du processus. Le niveau initial n'est pas le seul critère de réussite. Il arrive que des gens, suite à des handicaps associés (surdité partielle par exemple), soient peu performants à l'évaluation et effectuent par la suite une très bonne progression. Les facteurs déterminants sont les besoins importants en déplacement dans la vie quotidienne et le fait que la personne tire le meilleur parti de ses outils. Celui qui néglige la manipulation de sa canne aura une grande probabilité de négliger aussi le maniement de la canne électronique à long terme.

Les utilisations courantes :

L'appareil le plus utilisé est le *Tom Pouce I* avec ses trois portées : 80cm, 1,5m et 3m. Ses avantages sont : son faible coût, sa grande robustesse et sa simplicité d'utilisation qui le rend particulièrement adapté aux débutants. La portée utilisée par défaut en extérieur est de 3m, c'est celle qui apporte une anticipation permettant de déambuler en laissant un temps de réaction suffisamment confortable. On réduit la portée à 1,5m seulement si on ne trouve pas de passages dégagés avec la portée de 3m, la vitesse de marche doit alors être réduite. Dans le métro par exemple la portée de trois mètres, très souvent, ne permet pas de détecter les passages, donc l'utilisateur doit réduire à 1,5m. La portée de 80 cm est peu utilisée sauf pour avancer doucement canne quasi verticale au travers d'une foule statique sur un quai de métro, repérer les personnes à mobilité réduite qui se trouveraient sur le passage dans les escaliers montants (les escaliers sont montés avec une canne tenue quasi verticalement).

Le *Télétact II* offre une mesure continue de 0    15m. Sa finesse angulaire permet d'analyser en détails les configurations en profondeur. Il présente un très faible taux d'obstacles non détectés correctement comme une vitre propre sous incidence inclinée (mais on trouve les supports) et sa portée se réduit à 6 ou 7m sous le très fort soleil. Un autre inconvénient est la fragilité; l'accident le plus fréquent pour les appareils est la canne posée contre un mur qui tombe. Les parties optiques correspondant à la triangulation laser sont à régler une fois par an en moyenne, voire deux fois. La richesse de son information permettant une bonne fluidité dans les contextes difficiles a l'inconvénient de consommer beaucoup d'attention et de fatiguer l'utilisateur sur de longues durées d'utilisation.

L'utilisation des différentes plages de distances est la suivante :

0-50cm : gérer les files d'attente et se faufiler, canne relevée quasi verticale, dans une foule dense statique, sans bousculer les gens surtout aux abords de la limite d'un quai. Se protéger lors de la montée des escaliers et éviter de bousculer une personne âgée montant plus lentement. Tout détail dans la mesure de la distance est inutile. Cette plage de distance est gérée par le proximètre infrarouge, le télémètre laser n'intervient pas.

50cm-1,5m : c'est une plage de distances où l'on ne doit pas rencontrer d'obstacles lorsque le déplacement est bien géré, car l'obstacle a dû être évité avant. On est dans la situation d'extrême urgence où la manœuvre d'évitement ne s'est pas faite à temps et où la seule solution est l'arrêt brutal. Une grande précision sur la distance a peu d'importance.

1,5m-4m : obtention à l'arrêt des profils détaillés et perception de la vitesse d'approche d'un obstacle mobile. C'est dans cette plage que la précision a le plus d'intérêt, car c'est vers 4 mètres de distance que se fait la manœuvre d'anticipation, et si ce n'est pas fait aux distances plus courtes, il faut l'entreprendre d'urgence. La résolution en distance du *Télé tact* et la justesse de la mesure indépendamment de la texture est un avantage clair par rapport au *Tom Pouce*.

4m-8m : intervalle de prise de conscience des obstacles et temps de la réflexion des actions à entreprendre. On a besoin de moins de précision que dans l'intervalle précédent. Cet intervalle est réservé au *Télé tact*

8m-15m : analyse de traversée de carrefours et trouver où se situe l'angle du mur d'en face afin de confirmer la direction de traversée. Cette fonction est également exclusive du *Télé tact*.

Au-delà de 15m : l'information n'est plus pertinente, car aucune personne n'a une direction de poignet assez fine pour analyser la position de l'obstacle par rapport à sa trajectoire (à droite ou à gauche).

Analyse des bénéfices apportés par les appareils

Il s'agit d'un problème complexe. La démarche de l'équipe a été de ne pas construire des "tests artificiels" pouvant prouver des bénéfices avant de les avoir constatés de manière empirique chez l'utilisateur au quotidien. Cette étape préalable a pris plus de dix ans. Il a fallu 7 ans (projet initié en 91) pour avoir le premier utilisateur performant au quotidien en 1998. Il a fallu quasiment deux ans de plus pour avoir 5 ou 6 utilisateurs de plus dont les progrès étaient clairement observables. A partir de 2006 le flux de nouveaux équipés (grâce au mécénat) est passé de 30 par an à une centaine par an pour atteindre 300 utilisateurs en 2007 et près de 600 en 2010. Un équipement ne se fait qu'avec une formation complète, ce qui réduit le flux pour des raisons logistiques. En effet il faut avoir accès à un rééducateur⁹ et à un financement qui se fait à l'échelle locale¹⁰. De plus les non-voyants ne sont pas répertoriés par la Sécurité Sociale et il n'existe aucun moyen universel d'apporter une information, qui ne se fait que par des canaux associatifs ne couvrant que très partiellement la population.

Une première étude a porté sur 16 non-voyants qui ont dû faire des trajets réels inconnus intérieurs et extérieurs avec, au départ, des indications verbales

9. Il y en a une centaine en France, concentrés dans les très grandes villes.

10. Qui diffère d'une région à l'autre en fonction des partenaires que sont le mécénat et les caisses primaires d'assurance maladie.

définissant le point d'arrivée (exemple : prendre la deuxième à droite et s'arrêter 30 mètres plus loin, revenir sans reprendre le même chemin). Les trajets faits dans Paris (rues pour les extérieurs et centres commerciaux pour les intérieurs) ont été classés par couples considérés comme équivalents en difficultés soit à la canne seule et soit avec l'appareil. Les trajets ont été croisés pour que ce ne soit pas toujours les mêmes faits à la canne seule ou avec les appareils. Les utilisateurs ont été filmés et notés par deux observateurs sur : le nombre de chocs, les défauts de fluidité de la démarche, l'aptitude à contourner les obstacles et éviter les impasses, l'arrivée ou non à destination dans le trajet [48].

Une seconde technique a consisté, toujours sur le principe du couple de trajet équivalent fait alternativement à la canne seule ou avec appareil, à noter toutes les différences par rapport au trajet effectué visuellement par trois voyants de référence. Chaque écart avec la trajectoire moyenne du voyant donne lieu à des points négatifs : 0,5 point pour une légère retenue dans la marche, un point pour un arrêt, deux points pour une collision avec un obstacle ou l'entrée dans une impasse etc. et un nombre de points positifs pour être arrivé à destination [49].

Les deux études montrent que l'effet essentiel est une amélioration relative des performances de l'individu. Le niveau relatif de déambulation des individus à la canne est en général respecté avec l'aide électronique (les meilleurs restent les meilleurs). Des gens très bons à la canne seule pourront être meilleurs que des gens avec handicaps associés à la canne électronique. Par contre la progression des gens faibles à la canne seule pour cause de handicap associé (et non par négligence des techniques de locomotion) peut être plus importante que celle de ceux sans handicap associé qui sont déjà bons. Pour les meilleurs on obtient des scores proches de la référence des voyants. Remarquons toutefois qu'il y a un manque sur la technique d'évaluation des performances du capteur en lui-même indépendamment du reste. Ce sera un point à étudier.

2.6 Objectifs de la thèse

Cette thèse a reçu le soutien d'une bourse CIFRE avec la finalité d'améliorer le service rendu aux non-voyants à moyen terme (3-6 ans). La détermination des besoins dans ce domaine est une chose complexe. Le très faible taux d'utilisation par le passé des dispositifs électroniques n'a pas permis de se baser sur un besoin exprimé. L'équipe de recherche a été dans une situation de propositions et d'analyse des retours et les évolutions se font dans le même contexte. De manière caricaturale nous avons deux types de retour, celui de non-voyants non autonomes qui émettent des besoins théoriques irréalistes et n'utilisent pas le matériel existant et ceux des gens autonomes qui utilisent au mieux leur appareil en revendiquant peu d'améliorations. Les axes d'évolution sont plutôt issus de l'observation des utilisateurs, de leurs réussites et de leurs failles, de la synthèse des événements

constatés par le service après vente, de l'analyse des causes d'échecs de certains ou d'abandon après une période d'utilisation.

Après avoir participé à l'amélioration des performances des appareils existants au début de ma thèse, il s'est agit d'effectuer les actions nécessaires pour mettre au point la génération suivante de dispositifs. Résumons quelques axes identifiés qui sont l'objet de ce travail :

- *Trouver une façon d'analyser l'espace permettant de déambuler avec peu d'efforts cognitifs* sans avoir de limitation en contre partie : actuellement le *Tom Pouce* permet de déambuler avec peu d'efforts d'analyse mais ne permet pas de gérer les configurations complexes comme les passages en chicanes, les foules etc. Le *Télé tact*, par contre, permet de gérer ces situations mais demande beaucoup de concentration et d'analyse à l'utilisateur.
- *Apporter des nouveaux outils pour évaluer les performances du matériel et des utilisateurs.*
- *Trouver des solutions pour identifier de manière simple des objets qui ne découlent pas directement du signal télémétrique* : les passages piétons, les escaliers etc.

Chapitre 3

La détection infrarouge

3.1 Introduction

La détection d'obstacles utilisant les capteurs infrarouges "actifs" à LED (Proximité Infrarouge) a été développée par le groupe d'instrumentation du Laboratoire Aimé Cotton. Elle a donné lieu à un dispositif proposé aux non-voyants débutant avec les aides électroniques, appelé le *Tom Pouce I*. C'est un appareil fixé à la canne blanche et principalement utilisé en extérieur. Le principe de fonctionnement est le suivant : un cône de lumière infrarouge horizontal est émis vers l'obstacle, une partie de la lumière rétrodiffusée par l'obstacle est collectée par un récepteur situé près de l'émetteur. L'appareil peut détecter des obstacles jusqu'à trois mètres, la largeur de la zone de détection des obstacles est alors de l'ordre du mètre. L'appareil étant situé à environ 90 cm du sol, l'augmentation de sa portée n'a pas été possible. En effet le faisceau serait devenu trop large et aurait été trop près du sol. Il y aurait eu confusion entre les obstacles franchissables (bordures de trottoir) qui ne doivent être détectés que par la canne blanche et les obstacles frontaux nécessitant une modification de la trajectoire. Dès lors, la compréhension et le contrôle de chaque paramètre qui intervient dans la détection était nécessaire pour produire un appareil plus performant, c'est-à-dire à la portée plus allongée et moins large.

3.2 Objectif du chapitre

La recherche d'un compromis permettant d'être efficace, tout en restant simple d'utilisation est notre but principal. La proximité infrarouge se présente comme une technique à très basse résolution angulaire. Elle est donc plus globale et fait naturellement le travail de recherche d'un passage sans entrer dans les détails de

la forme des obstacles qui sont non primordiaux. Par contre cette technique mise en œuvre dans le *Tom Pouce I* a la réputation établie par les utilisateurs d'être bien moins performante que la triangulation laser mise en œuvre dans le *Téléfact* : avec un *Tom Pouce* on n'arrive pas à gérer les passages en "chicane" contrairement au *Téléfact*, parfois il y a de la place pour passer et l'appareil indique que c'est bouché. Si on mesure le cône de détection de l'appareil face à un passage de porte, on trouve une zone de détection d'obstacle, vue du dessus, qui a l'allure représentée approximativement à la Fig. 3.1 :

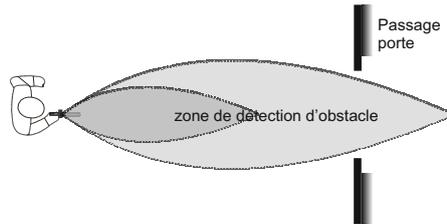


FIGURE 3.1: Zone de protection du *Tom Pouce I* (portées longue et courte)

La Fig. 3.1 illustre une situation où le passage est initialement détecté puis deux pas plus tard signalé comme obstrué. Si on réduit la portée, alors le passage est trouvé, mais ne peut plus être perçu à grande distance. Pour améliorer le système il est nécessaire d'étirer en longueur la zone de protection sans l'élargir. Idéalement la zone de protection devrait avoir une forme plus cylindrique, c'est-à-dire de largeur quasi constante sur toute la portée de détection permettant de trouver un passage de taille humaine (Fig. 3.2 (a) et (b)).

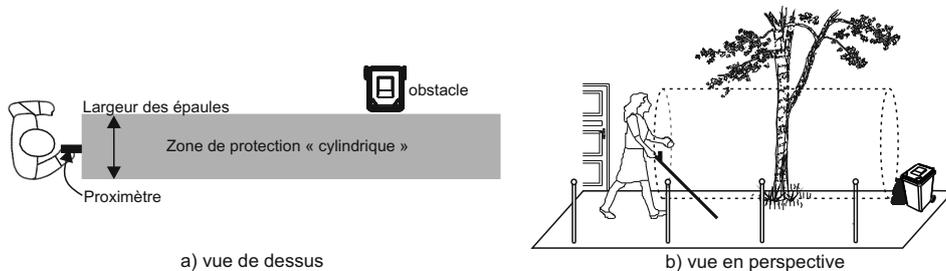


FIGURE 3.2: Champ de détection idéal des genoux à la tête

Il serait souhaitable que la zone de protection aille des genoux à la tête tout en gardant son aspect cylindrique en largeur. La détection ne doit partir que du niveau des genoux car une remontée de trottoir ne doit pas être considérée comme un obstacle. Les obstacles plus bas que les genoux sont des obstacles potentiellement franchissables et ne doivent pas être considérés comme une obstruction du passage. Ils seront détectés à la canne et non signalés à l'appareil. Cette caractéristique les identifie pour l'utilisateur qui cherchera ou pas à les franchir selon le

contexte.

3.3 Le proximètre infrarouge

3.3.1 Principe de fonctionnement

Le proximètre infrarouge est un système composé d'un émetteur à diode électroluminescente (LED) et d'une photodiode de réception associée à une optique. La LED projette de la lumière vers l'obstacle. Une partie de la lumière rétrodiffusée par ce dernier est collectée par la photodiode de réception (Fig. 3.3).

L'émetteur et le récepteur sont placés dans le même boîtier et isolés optiquement afin d'éviter un passage direct de la lumière de l'émetteur vers le récepteur. L'axe optique de la LED est parallèle à celui de l'optique du récepteur et espacé de quelques millimètres de celui-ci.

La longueur d'onde de l'émission est dans le domaine de l'infrarouge proche, située entre 830 et 980 nm. Le récepteur contient une photodiode au silicium amplifiée sensible entre 400 et 1100 nm associée à un filtre coloré coupant la lumière visible en dessous de 800 nm. Pour s'affranchir de la lumière diurne la LED fonctionne en régime pulsé.

Lorsque le signal électrique délivré par le récepteur, après traitement, atteint un certain seuil E_{seuil} on dit qu'il y a un retour. La zone de l'espace située autour de l'axe d'émission de la LED où la présence d'un obstacle produit un signal est le champ de perception de l'appareil, Fig. 3.4.

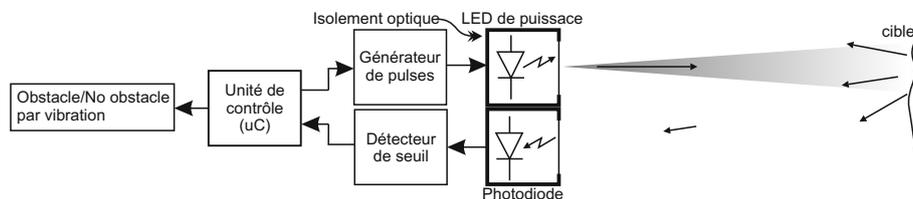


FIGURE 3.3: Diagramme de détection du proximètre

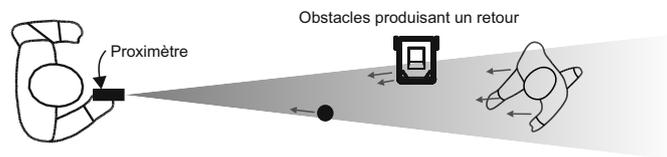


FIGURE 3.4: Perception du proximètre

Un microcontrôleur commande les pulses d'émission de la LED et traite le signal binaire final de l'électronique de réception. La présence ou non d'un obstacle dans le champ de perception de l'appareil est indiquée à l'utilisateur par le

déclenchement d'une vibration. Les vibrations sont générées par des moteurs à courant continu équipés d'un balourd du même type que ceux utilisés dans les téléphones portables.

3.3.2 Champ de perception

L'estimation du champ de perception du dispositif est faite à partir de l'étude de la puissance reçue sur la photodiode en fonction de la puissance d'émission et de la nature de l'obstacle. Pour augmenter les dimensions de ce champ on augmente la puissance d'émission de la LED en gardant un seuil de détection fixe pour la photodiode. A une puissance d'émission correspond une dimension du champ de perception appelée portée. Plusieurs portées sont à disposition de l'utilisateur qui doit les choisir en fonction du niveau d'encombrement de son trajet. Ces dimensions devront s'adapter aux différentes configurations rencontrées dans la vie réelle. L'utilisation des portées est connue suite à l'expérience acquise par les années d'utilisation du *Tom Pouce I* [50] :

- Gérer une file d'attente : utilisation d'une portée de longueur inférieure à un mètre.
- Déambuler dans un couloir étroit encombré (portée de longueur 2 mètres).
- Se déplacer à contre sens dans une foule (portée de 2 ou 3 mètres selon la densité de la foule).
- Trouver le meilleur passage dans un trottoir large (portée de 3m).
- Trouver les couloirs les plus larges dans les grands espaces (portée de 3m).

En pratique l'utilisateur choisit par défaut la plus grande portée lui permettant de trouver un passage libre adéquat. Le champ de perception doit être contrôlé dans toutes ses dimensions pour réussir à être plus long et moins large afin d'avoir des portées allant au-delà de 3m en longueur. Pour cela, on modélise l'émission de la LED, le récepteur, les diaphragmes et les obstacles typiques afin de réaliser la prédiction. Elle se base sur un calcul photométrique qui permet de :

- Mieux comprendre les propriétés du champ de perception.
- Trouver l'influence de la distribution de l'intensité de la LED et du champ du récepteur ainsi que des autres paramètres géométriques sur le champ de perception, afin de l'optimiser.
- Déterminer la trajectoire théorique d'un non-voyant respectant les recommandations d'utilisation afin de mieux séparer par la suite les erreurs humaines de pilotage des limites du capteur. Ce point sera développé au chapitre 5.

3.3.3 Calculs photométriques avec des obstacles typiques

La détection des obstacles par le faisceau infrarouge dépend de plusieurs facteurs comme : la distribution d'intensité de l'émetteur, le champ de l'optique de

réception, l'albédo¹, la taille et la forme, l'angle de présentation de l'obstacle.

Pour simplifier, on considère que tous les obstacles ont une surface Lambertienne d'albédo ρ , ce qui est très éloigné de la réalité. Certains obstacles sont coopératifs (plaques d'immatriculation, panneau de signalisation, etc.) et renvoient beaucoup plus de lumière qu'un panneau blanc mat dans la direction de l'émetteur, alors que d'autres sont foncés et spéculaires donc renvoient très peu la lumière vers l'émetteur. Le spot projeté sur les obstacles est généralement plus large que les détails de ces derniers. La valeur utile est la quantité de lumière renvoyée globalement dans la direction d'émission. Ainsi, un obstacle, quelle que soit sa texture ou sa forme, peut avoir un équivalent Lambertien de mêmes dimensions avec un albédo moyen valable dans la direction d'émission.

La distribution de l'intensité I de l'émetteur est mise en équations à partir de la fiche technique du fabricant fournissant les mesures expérimentales. Cette distribution se situe entre une Gaussienne et une Lorentzienne, la fonction mathématique s'ajustant le mieux aux données du fabricant est l'équation de Pearson VII [51]. L'axe du module de détection est placé à 15mm de l'axe de l'optique de la LED. Cette séparation est négligeable par rapport à la distance à l'obstacle qui est à plus de un mètre. Ainsi le détecteur est considéré comme étant à la même position que l'émetteur. On considère que la surface de réception est un panneau plan carré, on prend en compte des limites du champ angulaire du récepteur. Cinq cas particuliers d'obstacles sont étudiés : un panneau latéral, un panneau frontal, deux panneaux en configuration de porte, un panneau incliné et un mur parallèle à l'axe d'émission.

Calculs sur les éléments plans (latéraux, frontaux, inclinés, ouvertures..)

Soit $I(\theta)$ la distribution d'intensité de la LED placée à l'origine du repère. le faisceau se propage selon l'axe z horizontal vers un obstacle qui se trouve à une distance l . L'obstacle rétrodiffuse la lumière qui est collectée par une photodiode d'aire dA . La surface de l'obstacle est considérée Lambertienne d'albédo ρ . L'éclairement E sur le détecteur est calculé par une approche d'optique géométrique. L'obstacle est un plan placé verticalement face à la LED (Fig. 3.5).

H est la projection orthogonale de l'origine O des coordonnées (position de la LED) sur le plan obstacle P . Dans la Fig. 3.5, θ_p est l'angle entre le segment OH et l'axe de propagation z , M le point d'intersection de z avec le plan P , da une surface élémentaire de l'obstacle centrée autour d'un point N , \hat{n} le vecteur unitaire normal à da , θ l'angle entre la droite ON et l'axe z , θ_a est l'angle entre la direction de \hat{n} et le vecteur position $r = ON$. L'équation du plan P vertical parallèle à l'axe y est :

$$z = l + x \tan \theta_p, \forall y$$

1. L'albédo est une grandeur sans dimension, rapport de l'énergie lumineuse réfléchiée par une surface diffusante à l'énergie lumineuse incidente.

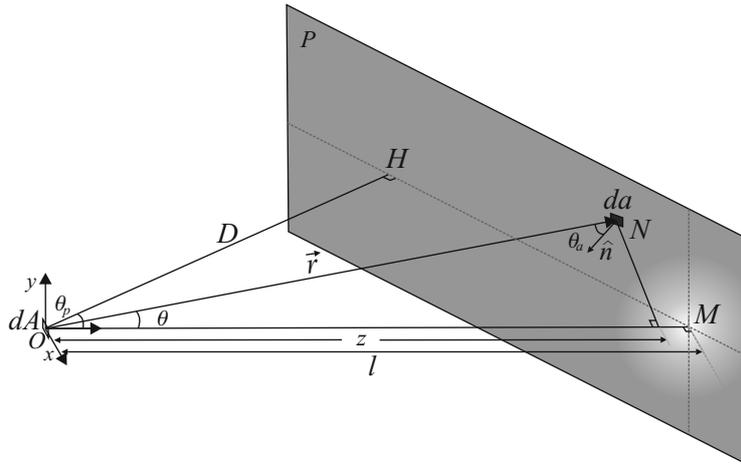


FIGURE 3.5: Position relative de la LED et du plan incliné

Le flux arrivant sur da est [52, 53, 54] :

$$d\phi_{da} = I(\theta)d\Omega \quad (3.1)$$

avec $d\Omega = da \cos \theta_a / R^2$ et $R = z / \cos^2 \theta$

L'éclairement E_{da} sur da est :

$$E_{da} = \frac{d\phi_a}{da} = \frac{I(\theta)}{z^2} \cos \theta_a \cos^2 \theta$$

Le plan est considéré comme une surface Lambertienne, sa luminance est donc $L_a = \rho E_a / \pi$:

$$L_a = \frac{\rho I(\theta)}{\pi z^2} \cos^2 \theta_a$$

Soit $d\phi_{da}$ le flux provenant de la surface da de l'obstacle arrivant sur la surface dA du récepteur de :

$$d\phi_{da} = L_a \frac{da \cos \theta_a dA \cos \theta}{R^2}$$

où

$$d\phi_{da} = \frac{L_a}{z^2} \cos \theta_a \cos^3 \theta da dA$$

En remplaçant L_a dans $d\phi_{da}$:

$$d\phi_{da} = \frac{\rho I(\theta)}{\pi z^4} \cos^2 \theta_a \cos^5 \theta da dA$$

L'éclairement sur dA devient :

$$E = \frac{d\phi_{da}}{dA} = \frac{\rho}{\pi \cos \theta_p} \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \frac{I(\theta)}{z^4} \cos^2 \theta_a \cos^5 \theta dy dx \quad (3.2)$$

où $\cos \theta_a = \hat{n} \cdot \vec{r}/r$ avec $\hat{n} = \sin \theta_p \hat{x} - \cos \theta_p \hat{z}$ et $\vec{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$:

$$\cos \theta_a = \frac{x \sin \theta_p - (l + x \tan \theta_p) \cos \theta_p}{\sqrt{(l + x \tan \theta_p)^2 + x^2 + y^2}}$$

L'angle θ est :

$$\theta = \arccos\left(\frac{l + x \tan \theta_p}{\sqrt{(l + x \tan \theta_p)^2 + x^2 + y^2}}\right)$$

En pratique le champ d'émission de la LED est limité par un diaphragme situé quelques millimètres devant la LED (Fig. 3.3). Dans l'équation (3.2) ce diaphragme coupe l'émission au-delà d'un angle spécifique θ_f . Afin de limiter la lumière diurne entrant dans le récepteur, le champ de l'optique de réception est également ajusté à θ_f .

La nouvelle expression de l'éclairement est :

$$E = \begin{cases} \frac{\rho}{\pi \cos \theta_p} \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \frac{I(\theta)}{z^4} \cos^2 \theta_a \cos^5 \theta dy dx & \text{si } \theta \leq \theta_f \\ 0 & \text{si } \theta > \theta_f \end{cases} \quad (3.3)$$

Les limites d'intégration de (3.2) ou (3.3) peuvent être choisies selon les types d'obstacles étudiés, comme par exemple : un panneau de face ou deux panneaux en configuration porte.

L'équation (3.3) est valide pour toutes les surfaces planes et/ou inclinées avec un angle θ_p autour de l'axe y . ($\theta_p < 90$ deg).

Dans le cas particulier d'une surface parallèle à l'axe d'émission z ($\theta_p = 90$ deg) on reprend dans le paragraphe suivant le calcul.

Plan parallèle à l'axe d'émission

En utilisant l'équation (3.1) : la distribution d'intensité $I(\theta)$ reste la même, l'angle solide selon la Fig. 3.6 est :

$$d\Omega = \frac{da \cos \theta_a}{r^2}$$

où $r^2 = \|\vec{r}\|^2 = x_0^2 + y^2 + z^2$ et le flux $d\phi$ sur da sera :

$$d\phi_a = \frac{I(\theta)}{r^2} da \cos \theta_a$$

L'éclairement sur le plan est :

$$E_{da} = \frac{d\phi_a}{da} = \frac{I(\theta)}{r^2} \cos \theta_a$$

La luminance Lambertienne L_a du plan s'écrit :

$$L_a = \frac{\rho I(\theta)}{\pi r^2} \cos \theta_a$$

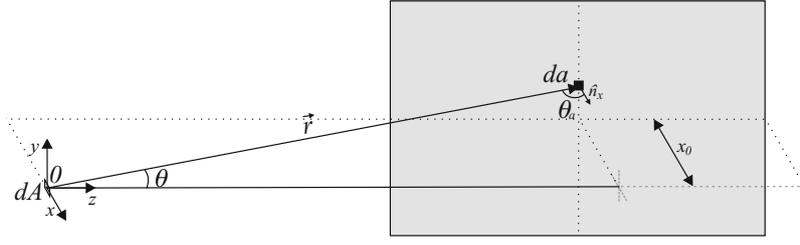


FIGURE 3.6: Diagramme du plan parallèle à l'axe d'émission infrarouge

Et le flux qui arrive sur dA :

$$d\phi_{dA} = L_a \frac{dA \cos \theta_a \cos \theta}{r^2}$$

En remplaçant L_a par son expression, on obtient :

$$d\phi_{dA} = \frac{\rho I(\theta)}{\pi r^4} \cos^2 \theta_a \cos \theta dA da$$

Dont l'éclairement E_{dA} :

$$E = \frac{\rho}{\pi} \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \frac{I(\theta)}{z^4} \cos^2 \theta_a \cos \theta dy dx \quad (3.4)$$

Où

$$\theta = \arccos \frac{z}{\sqrt{x_0^2 + y^2 + z^2}}$$

Et

$$\cos \theta_a = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y^2 + z^2}}$$

En suivant le même traitement de (3.3), (3.4) devient :

$$E = \begin{cases} \frac{\rho}{\pi} \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \frac{I(\theta)}{z^4} \cos^2 \theta_a \cos \theta dy dx & \text{si } \theta \leq \theta_f \\ 0 & \text{si } \theta > \theta_f \end{cases} \quad (3.5)$$

θ_f est l'angle maximal d'émission de la LED limité par la coupure du diaphragme de sortie.

3.3.4 Calculs théoriques et expérimentation

L'objectif du calcul est la prédiction du champ de perception du proximètre pour un obstacle type représentatif d'un passage de porte, d'un poteau, d'un mur, etc. Le premier intérêt du calcul est d'optimiser les différents paramètres du proximètre : distribution d'intensité de la LED, structure du récepteur afin d'améliorer la fonctionnalité du champ de perception.

Les calculs qui suivent ont été faits avec le logiciel Mathematica version 7 et les routines sont présentées dans l'annexe A.

Pour résoudre l'équation (3.3) on a besoin de la fonction de distribution d'intensité $I(\theta)$. Celle-ci est donnée par le diagramme de radiation fourni par le constructeur de la LED. Une fonction Pearson VII a été utilisée pour faire l'ajustement des données du fabricant. Cette fonction a été choisie car c'est elle qui a donné le coefficient de corrélation le plus élevé de 0.999.

La distribution d'intensité $I(\theta)$ interpolée par l'équation de Pearson VII est :

$$I(\theta) = I_0 + A_c \frac{2\Gamma(m)\sqrt{2^{1/m}-1}}{\sqrt{\pi}w\Gamma(m-1/2)} \left[1 + 4\frac{2^{1/m}-1}{w^2}\theta^2 \right]^{-m} \quad (3.6)$$

où I_0 est l'offset, w la largeur à la moitié de l'amplitude maximale de la courbe, A_c est l'amplitude, m est le paramètre de forme et Γ est la fonction Gamma d'Euler $\Gamma(m) = \int_0^\infty e^{-u}u^{m-1}du, m > 0$

La forme de cette fonction peut être facilement modifiée en adaptant son paramètre m . Avec $m = 1$, elle devient une fonction Lorentzienne et avec m infini, elle s'approche de la forme caractéristique d'une fonction Gaussienne. Ces propriétés sont importantes pour faire les analyses avec différentes configurations d'émission.

De manière pratique on contrôle les paramètres A_c , θ_f , w et m de la façon suivante :

- A_c , l'intensité principale du signal, est contrôlée par le courant injecté dans la LED.
- θ_f , l'angle maximal d'émission de la LED est contrôlé par un diaphragme de sortie collé à la fenêtre de sortie de l'émetteur
- w , l'angle d'émission à mi puissance, est contrôlé par l'optique associée à la LED, et peut être modifié par une optique additionnelle.
- m , le facteur de forme de la courbe d'émission, dépend des propriétés de la surface émissive et de la structure catadioptrique de l'optique d'émission de la LED (miroir parabolique associé à un dioptré). Les valeurs de m des différentes LED commerciales que nous avons évaluées varient entre 0,5 et 300.

Les mesures expérimentales sont faites initialement avec un module de proximité infrarouge avec une distribution d'intensité de la source qui a les paramètres suivants : $w = 0,10rad$, $A_c = 0,74W/sr$, $I_0 = 0,02W/sr$, $m = 1,39$ et $\theta_f = 18deg$. Le système a un seuil de détection (Fig. 3.3) fixé à $2,5 \times 10^{-4}W/m^2$. On cherche à fixer les paramètres à une valeur donnant un champ de protection suffisant pour protéger la largeur des épaules avec une portée supérieure à 3m.

Les impulsions de courant dans les LED sont d'amplitude croissante et gérées par un microcontrôleur, elles varient entre 20mA et 1A. Dès qu'un obstacle est détecté les tirs cessent. La longueur d'onde centrale de la LED est 950nm et la divergence du faisceau $I(\theta)$ à mi hauteur est de 6 deg.

On a vu au paragraphe 3.3.2 qu'à chaque puissance d'émission de la LED correspondait une géométrie de la zone de protection appelée portée. L'utilisateur

choisit une portée correspondant à une puissance de référence du tir de la LED. On relève la puissance du dernier tir de la LED et on la compare à la puissance de référence. Si elle est inférieure, on signale l'obstacle, si elle est supérieure on signale le passage. Dans la suite on fera référence à des portées $R1, R2, \dots, R5$ où $R5$ est la plus faible.

Les obstacles typiques qui ont été disposés sont deux panneaux de $1m \times 2m$ construits pour l'expérience. Pour avoir une bonne identification de leur albédo, les panneaux ont été couverts de papier blanc diffusant (caractéristique Lambertienne d'albédo 0,99). Ces deux panneaux ont été utilisés pour former divers obstacles comme par exemple : un panneau latéral ou un passage étroit.

Zone de sécurité

Panneau latéral

L'intérêt est de connaître la zone de protection donnée par l'appareil pour l'utilisateur lorsque celui-ci s'approche vers un panneau vertical de $1m \times 2m$. Pour caractériser le champ de perception, on fixe l'appareil sur un trépied et on déplace le panneau autour jusqu'à obtention du seuil.

L'appareil été fixé sur un tripode à une hauteur d'un mètre. Selon la Fig. 3.7, l'appareil pointe dans la direction z horizontale. Le panneau, initialement placé à une distance z_0 hors de la portée de l'appareil est déplacé perpendiculairement vers l'axe z . Quand le seuil d'alerte (vibration) se déclenche les coordonnées x_0 et z_0 sont relevées. Plusieurs points ont été notés pour chaque distance z_0 entre 0,2m et 8m.

Les calculs théoriques sont faits pour cinq amplitudes d'émission (portées). Les résultats sont montrés dans la Fig. 3.8, en utilisant les paramètres suivants : $w = 0,1rad$, $I_0 = 0,02W/sr$, $\theta_f = 18deg$. Dans la Fig. 3.9, A_c correspond à la portées $R1$ avec $m = 1,39$.

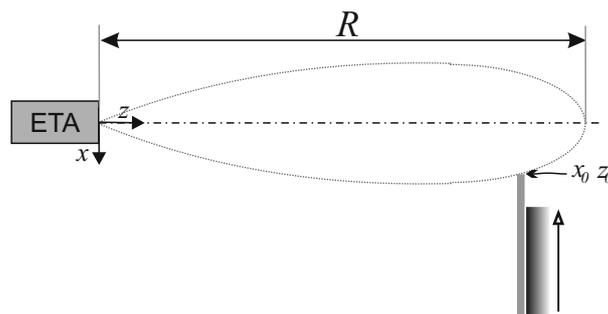


FIGURE 3.7: Schéma expérimental de mesure avec le panneau

La Fig. 3.8 montre les portées probables, $R1$ à $R5$, d'un appareil. $R1$ et $R2$ ont une largeur de zone de protection supérieure à la largeur des épaules avec m égal à 1,39. Une figure à échelle réelle met en évidence la directionnalité de la zone de

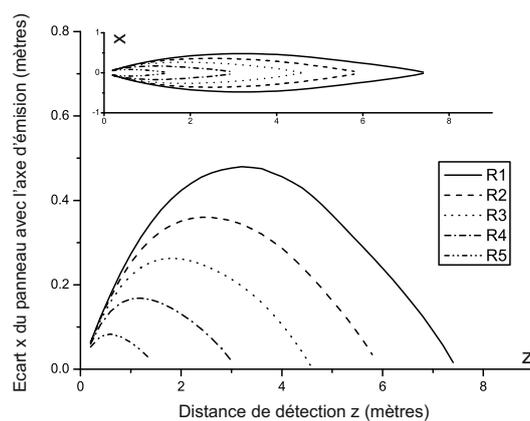


FIGURE 3.8: Champ de perception théoriques du panneau latéral

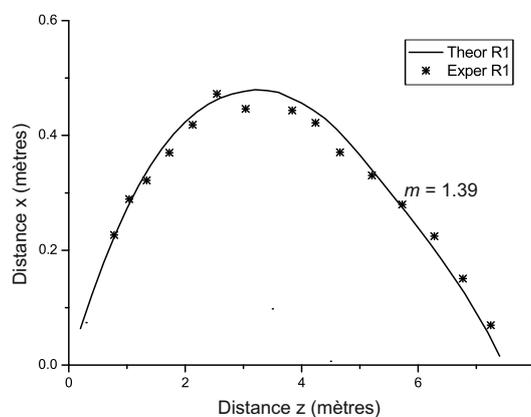


FIGURE 3.9: Champs de perception expérimentaux et théoriques pour un panneau blanc de 1m×2m latéral

protection. La validation expérimentale de la portée $R1$ est donnée à la Fig. 3.9 avec le *Minitact*.

Deux panneaux : modèle de passage étroit de porte

La distance de détection d'un passage étroit est mesurée pour chaque portée de l'appareil. On veut connaître quelle est la distance maximale de détection d'une porte ou une ouverture et quelle est l'ouverture d du passage détecté. Pour cela deux panneaux coplanaires ont été disposés et séparés d'une distance d qui simulent une porte ouverte. On fait varier l'écart d pour trouver la distance à laquelle le passage étroit est détecté. L'utilisateur commence à s'approcher sur l'axe de passage à partir de 12m perpendiculairement aux panneaux. Lorsque le signal d'alerte est activé, la prise en compte de la distance de l'endroit où celui-ci s'est produit est notée comme $z2$ (Fig. 3.10). On continue à s'approcher jusqu'à ce que l'on atteigne le seuil d'extinction de la vibration. Ce deuxième point est

noté z_1 . Cette procédure est faite pour d compris entre $0,2m$ et $0,6m$.

Les calculs théoriques ont été faits pour cinq valeurs d'amplitude d'émission et les résultats théoriques et expérimentaux sont montrés dans les Fig. 3.11 et Fig. 3.12. Les paramètres utilisés sont : $w = 0,1rad$, $I_0 = 0,02W/sr$, $\theta_f = 18deg$ et $m = 1,39$.

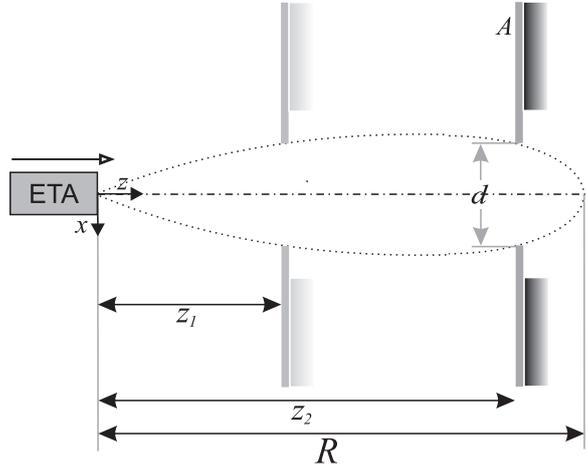


FIGURE 3.10: Schéma expérimental correspondant à une "porte ouverte"

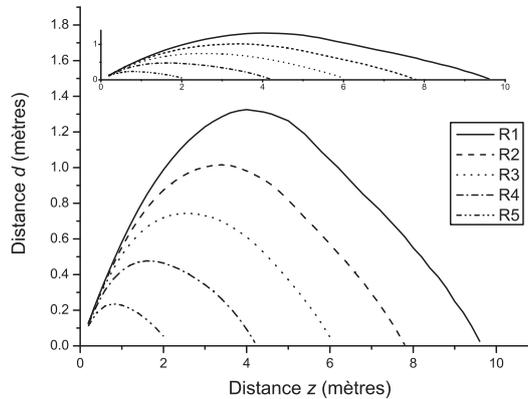


FIGURE 3.11: Champs de perception théoriques du passage étroit en fonction de la puissance A_c de l'émetteur calculé pour $m = 1,39$

Dimensions utilisées pour résumer la forme de la zone de protection

Pour caractériser la qualité de la "cylindricité" du faisceau on définit les paramètres suivants : portée maximale D_{max} , largeur maximale H_{max} , largeur à 20% de la portée maximale H_1 , largeur à 80% de la portée maximale H_2 (Fig. 3.13). Les deux valeurs principales caractérisant le faisceau sont le rapport : D_{max}/H_{max} et $\min(H_1, H_2)/H_{max}$. On cherche à avoir une valeur élevée pour le premier paramètre et proche de 1 pour le second, ce qui donne une "allure cylindrique" à la

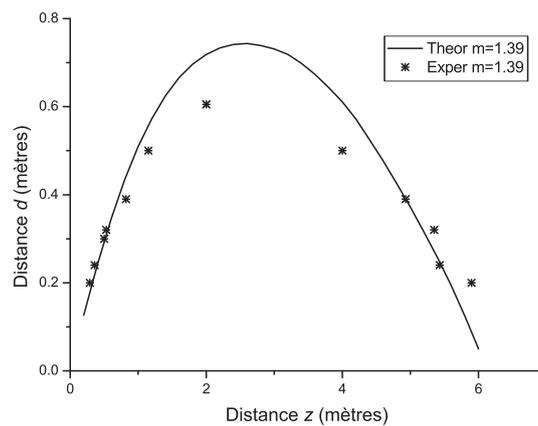


FIGURE 3.12: Champs de perception expérimental et théorique du passage étroit avec la portée R3

zone de protection.

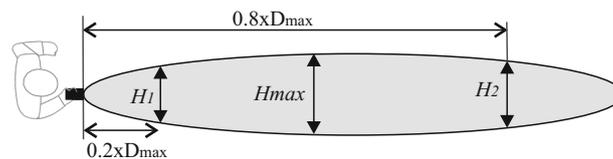


FIGURE 3.13: Dimensions de la zone de protection

D'après les données expérimentales fournies à la Fig. 3.9, on obtient :

– Pour la portée R5 de 7,5m et $m = 1,39$:

$$D_{max}/H_{max} = 16,6 \text{ et } \min(H_1, H_2)/H_{max} = 0,77.$$

Influence des différents paramètres du proximètre et de l'obstacle sur le champ de perception

Les paramètres importants pour la détermination du champ de perception sont d'après l'équation (3.6) : la largeur de la distribution d'intensité w , la puissance d'émission A_c , le paramètre de forme m , l'angle maximal d'émission de la LED limité par la coupure du diaphragme de sortie θ_f (que l'on appellera angle d'apodisation), l'albédo ρ de l'obstacle et ses dimensions.

Paramètres de la LED : Dans l'équation (3.6), le paramètre w permet de modifier la largeur sans changer la longueur, Fig. 3.14(a). L'amplitude A_c agrandit la longueur et la largeur, Fig. 3.14(b). L'angle d'apodisation permet de contrôler la largeur à courte distance sans modification appréciable de la longueur, Fig. 3.15(a). Finalement la largeur est réglée par le paramètre de forme, Fig. 3.15(b).

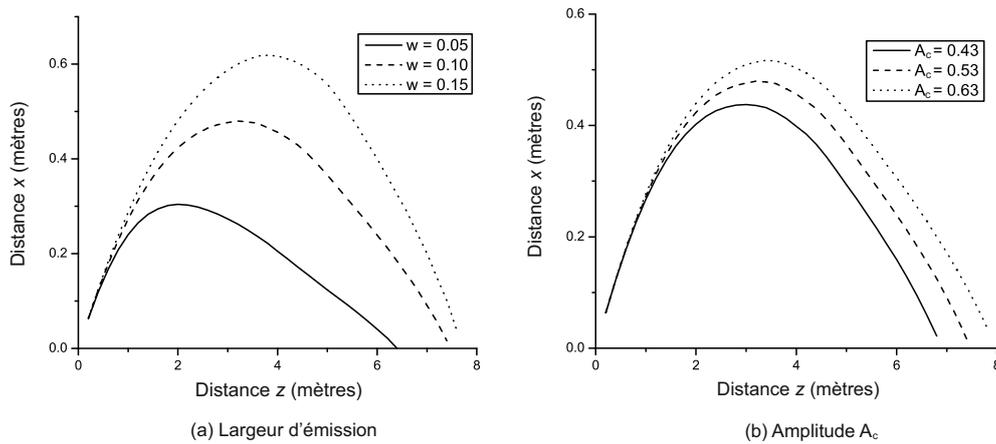


FIGURE 3.14: Dépendance des paramètres de la courbe de protection

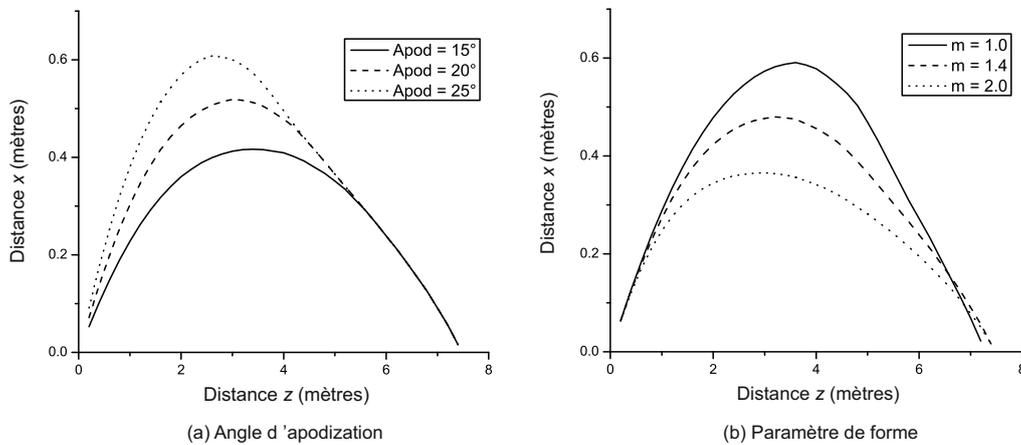


FIGURE 3.15: Dépendance du champ de perception en fonction des paramètres de la LED

La forme de la zone de protection est modifiée en partie par des paramètres que nous pouvons contrôler : profil d'émission de la LED, largeur du diaphragme en face de la LED. Nous retenons les paramètres permettant de se rapprocher le plus possible du profil cylindrique. Les valeurs que nous avons retenues dépendent de l'appareil. Cela est vu au chapitre 5, elles sont proches de celles utilisées pour la vérification expérimentale.

Le contrôle du paramètre m est le plus difficile à maîtriser. m est estimé par calcul pour donner une largeur de la zone de protection égale à celle des épaules. On achète une LED avec la valeur de m la plus proche et ensuite les autres paramètres sont facilement ajustables.

Influence de l'albédo et de la taille de l'obstacle : Les facteurs que nous ne contrôlons pas sont l'albédo et la forme de l'obstacle. Nous avons testé la variation de

portée sur des obstacles Lambertiens de différentes couleurs dans le domaine du spectre visible afin d'évaluer des variations de leur albédo à 950nm. Pour cela la distance de détection d'un panneau en fonction de sa couleur a été mesurée. Les panneaux étaient de $1\text{m} \times 0,65\text{m}$ en papier canson de $160\text{g}/\text{m}^2$. Les résultats sont présentés dans la Fig. 3.16

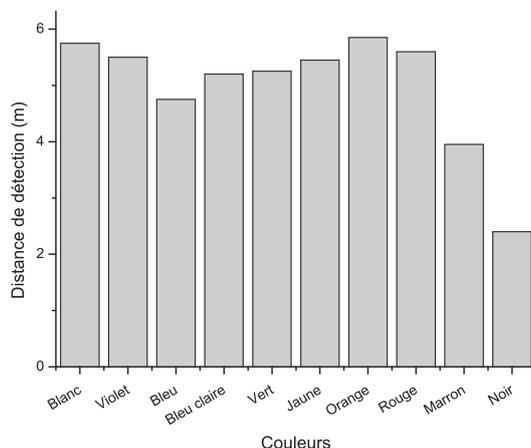


FIGURE 3.16: Distance de détection en fonction de la couleur de l'obstacle

On remarque sur la Fig. 3.16 que la distance de détection de l'appareil varie peu en fonction de la couleur, cela signifie que l'influence de l'albédo n'est pas significative sur le capteur. Le rapport des portées entre noir et blanc est de 0,43 ce que signifie que l'albédo du noir est d'environ 65%.

La détection de l'obstacle avec un albédo bas ($0,1 < \rho < 0,4$) a le même effet qu'une diminution de portée de l'appareil. L'obstacle est perçu à courte distance, cela n'affecte pas la fluidité de la marche de l'utilisateur, mais lui laisse moins de temps pour réagir. Cependant pour les poteaux noirs brillants anti stationnement l'anticipation est trop courte, Fig. 3.17 ($\rho < 0,1$). L'alerte de l'appareil anticipe à peine la canne qui doit prendre souvent le relais en entrant en contact avec le poteau.

La détection d'un panneau de circulation peut se faire avec une anticipation beaucoup plus grande que celle d'un panneau blanc pour un même champ de perception. Il s'agit de l'autre cas extrême d'obstacle.

La Fig. 3.17 montre la dépendance de la distance maximale du champ de perception en fonction de l'albédo et de la taille d'un obstacle. Par exemple un panneau de 1m de large et de 0,99 d'albédo détecté normalement à 8m de distance, ne pourrait être détecté qu'à 3m si son albédo était seulement de 0,1.

Hormis les cas des obstacles catadioptriques ou absorbants dans l'infrarouge (les surfaces noires dans le visible ne sont pas forcément absorbantes pour l'infrarouge proche), la plupart des obstacles courants ne montrent pas de différences gênantes dans le champ de perception.

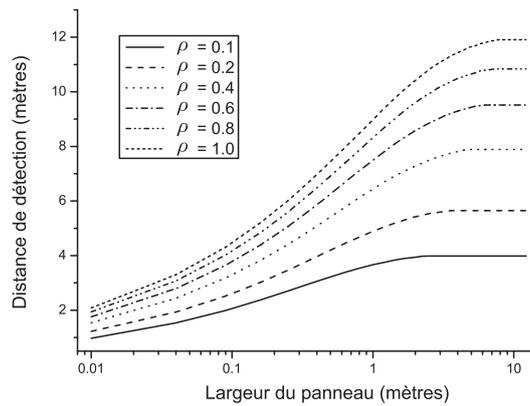


FIGURE 3.17: Détection du panneau par rapport à l'albédo et à sa taille

Surfaces courantes : Les surfaces courantes sont parfois un mélange de surfaces peu et très coopératives. Les voitures vues de face ou vues de l'arrière ont leurs plaques d'immatriculation et phares très coopératifs, et des surfaces brillantes sous incidence inclinées furtives. Le Tableau 3.1 montre la distance de détection d'objets courants avec la portée R5. (L'appareil est fixé à la canne blanche)

Obstacles	Détection (m)	Description :
Poteau d'aluminium	2,0	Diamètre : 13cm
Poteau noir brillant	1,5	Diamètre : 13cm
Poteau de bois	2,5	Diamètre : 20cm
Poubelle grande	3,2	Dimensions : 0,45m × 1m × 1,5m
Tronc d'arbre	3,9	Diamètre : 30cm
Tronc d'arbre	4,2	Diamètre : 60cm
Voiture de face	7	
Voiture de l'arrière	14	
Voiture de côté	3	

TABLE 3.1: Des obstacles typiques dans la rue

L'importance pratique des variations du champ de perception suivant la nature de l'obstacle sera rediscutée en pratique au chapitre 5. Le point fondamental est le suivant : on passe en pratique plus près des obstacles fins que des obstacles larges (on passe couramment près d'une personne ou d'un poteau, on frôle rarement un mur ou un camion). Cette propriété de l'appareil de détecter l'obstacle fin plus tard que l'obstacle large est probablement ce qui en fait un détecteur de passage libre permettant de reproduire assez bien la trajectoire du voyant en pratique.

La détection très tardive des poteaux noirs fins est le défaut majeur de cette technique. Les obstacles coopératifs sont moins gênants. Un arrière de voiture particulièrement coopératif soit obligera à réduire la portée pour trouver le passage

dans le cas d'une voiture garée sur un trottoir étroit, soit obligera à corriger sa trajectoire longtemps à l'avance dans le cas d'une voiture isolée sur un passage large. Dans les deux cas la trajectoire prise n'est pas aberrante par rapport à l'option qui aurait été prise par un voyant. Ces points sont détaillés au chapitre 5.

Variation de l'incidence : La Fig. 3.18 montre comment la portée de détection D d'un panneau varie en fonction de l'angle d'incidence de l'appareil θ_p et l'albédo.

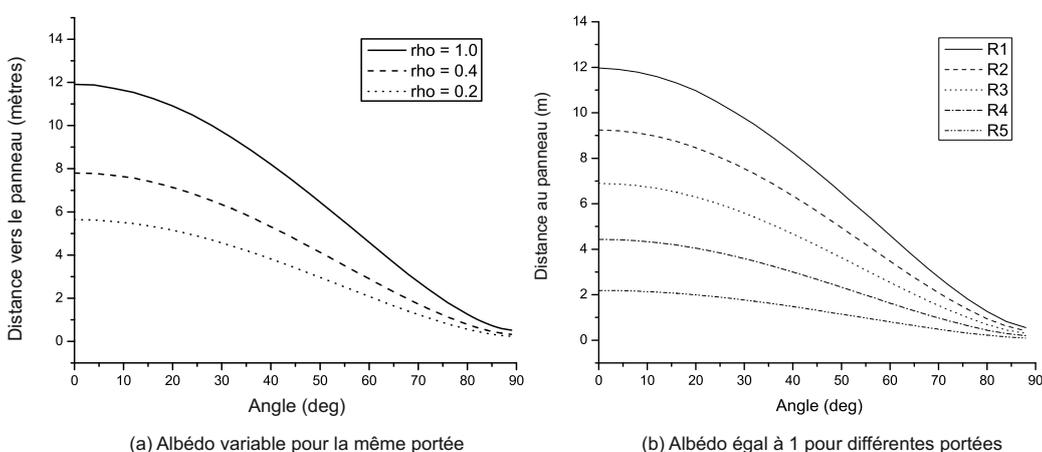


FIGURE 3.18: Détection d'un mur avec incidence arbitraire

La perte de portée en fonction de l'incidence est dans le cas général une propriété bénéfique car elle permet de trouver plus facilement le passage dans un couloir. Cette propriété sera rediscutée au chapitre 5. C'est un inconvénient pour la surface lisse foncée brillante sous incidence rasante qui ne sera pas détectée.

Les distances de détection en fonction de l'angle d'incidence ont été vérifiées expérimentalement pour la valeur de 45deg et sont reporté dans le Tableau. 3.2.

Largeur du panneau (m)	0.6m		1m	
Portée (m)	4	6	4	6
Détection à 0deg d'incidence (m)	3,5	5,2	4,1	6,0
Détection à 45deg d'incidence (m)	3,2	4,3	3,6	5,1

TABLE 3.2: Détection en fonction de l'angle d'incidence

3.4 Appareils implémentés avec la proximétrie infrarouge

La proximétrie infrarouge était initialement implantée dans le *Tom Pouce I*, sa nouvelle version a été implantée dans le *Tom Pouce II*. Dans le cadre de la thèse il a été tenté de développer trois nouveaux appareils avec cette technique : Le premier pour la protection du corps en intérieur : le *Minitact*, le deuxième pour la protection au niveau du sol et le troisième pour la protection de la tête.

3.4.1 Le *Tom Pouce II*

Le *Tom Pouce I* est un appareil fixé à la canne blanche qui utilise la proximétrie infrarouge. Il est utilisé par les non-voyants depuis 2000. Une nouvelle version le *Tom Pouce II* a été mise en circulation en 2010 incluant la configuration du capteur permettant un champ de perception “cylindrique”. Il est fixé à la canne et contient un faisceau destiné à protéger la tête, le champ de perception du faisceau destiné à la hauteur est volontairement évasé contrairement au faisceau horizontal.

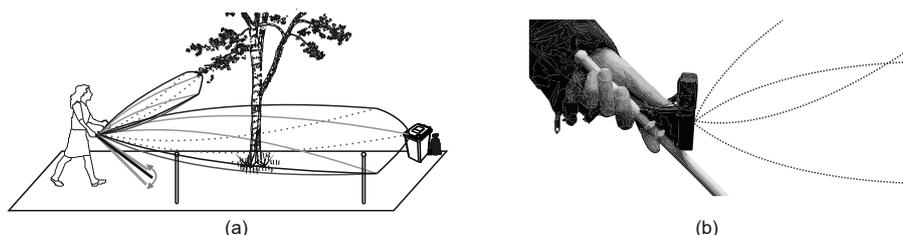


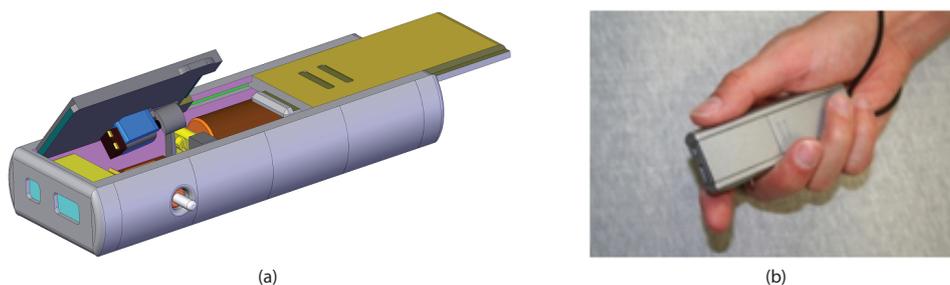
FIGURE 3.19: Le *Tom Pouce II*

3.4.2 Le *Minitact*

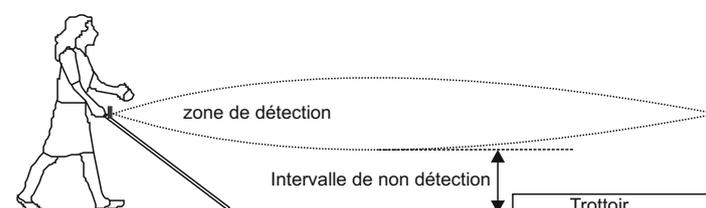
Le *Minitact* est un appareil conçu pour les déplacements en intérieur, tenu à la main, afin de balayer l'environnement dans un plan horizontal. Il a un seul faisceau orienté selon la longueur du boîtier. Le faisceau est conçu pour être moins large que celui du *Tom Pouce II*, soit pour avoir un meilleur rapport D_{max}/H_{max} . L'appareil a quatre portées commutables de 0,5m, 2m, 4m et 6m. On donnera plus de détails au chapitre 5 sur son fonctionnement. Cet appareil a été diffusé en petites quantités depuis 2007, tout en se mettant au point.

3.4.3 Appareil pour la protection du bas au sol

L'idée était de faire un capteur qui détecte les obstacles près du sol, dès qu'ils sont plus hauts qu'une bordure de trottoir. En effet, une bordure de trottoir ne doit pas être considérée comme un obstacle, puisqu'elle doit être franchie et non

FIGURE 3.20: Le *Minitact*

évitée. L'ensemble des appareils actuels laissent une zone de non détection entre la hauteur de 20 cm et la hauteur minimale détectée

FIGURE 3.21: Zone de non détection du *Tom Pouce*

L'appareil se fixait à 10cm du bout inférieur de la canne, Fig. 3.22(b). Le signal d'alarme se faisait à travers des vibrations par l'intermédiaire d'un boîtier attaché à la ceinture (communication par radio, Fig. 3.23).

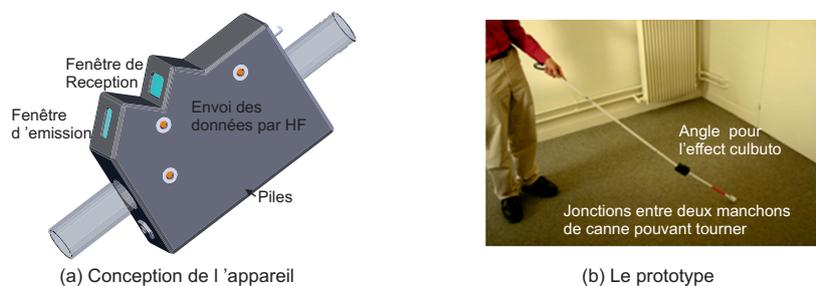


FIGURE 3.22: "Capteur bas de canne"

Plusieurs problèmes se sont posés, tout d'abord le positionnement vertical de l'appareil au cours du balayage de la canne. On a pensé qu'en pliant de quelques degrés la canne au niveau de l'appareil, on aurait un effet d'auto-positionnement grâce au poids de l'appareil. En pratique pour que cet effet soit utilisable, il fallait que l'appareil pèse plusieurs centaines de grammes ce qui est un poids inadmissible en bout de canne pour l'utilisateur. On a pensé ensuite faire une fixation des manchons de la canne pour éviter la rotation des segments au niveau de la jonction. Ainsi une bonne position de la main qui tient la canne permet un

positionnement correct du capteur, comme c'est le cas par exemple pour le *Tom Pouce*.

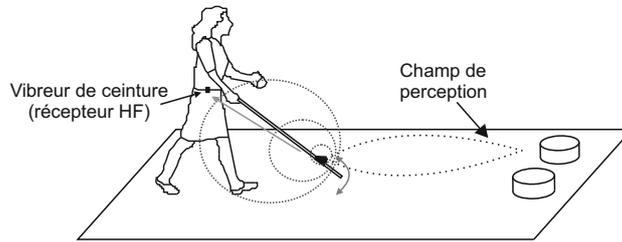


FIGURE 3.23: Configuration en bas de canne

Les essais initiaux ont été encourageants : la détection des poteaux noirs fins brillants à une distance de 1,5m devant le bout de la canne, suffisante pour les contourner a été obtenue. Les plots en ciments entre 30 et 40cm de hauteur étaient également correctement détectés. Par contre au bout de plusieurs minutes d'utilisation, le poids du capteur en bout de canne se fait particulièrement pesant sur sol rugueux. En effet l'embout roulant à cause du surpoids accroche davantage sur les aspérités rendant le balayage de la canne encore plus pénible qu'il ne l'était auparavant. Nous avons analysé le poids minimal que pouvait faire le capteur en jouant sur l'autonomie réduite à son minimum. Il était de 40 grammes. En mettant sur une canne à 10 cm de l'extrémité un surpoids de 40 grammes, sa maniabilité est demeurée insupportable sur sol rugueux. Nous avons essayé de mettre l'alimentation au niveau de la main et de ne garder que les parties émettrices et réceptrices au bout de la canne avec l'électronique de proximité. On est arrivé à un poids de 10 grammes. Par contre il fallait un câble passant dans la canne ou extérieur pour alimenter le capteur. En utilisant une canne rigide (non pliable) cela était possible, mais ergonomiquement non acceptable. Les câbles doivent donc résister à de multiples pliages et dépliages de l'utilisateur. Tous les câbles intérieurs ou extérieurs que nous avons essayé de passer dans la canne pliable se sont rompus rapidement.

Malgré certains aspects intéressants de ce capteur, les bénéfices apportés ne font clairement pas le poids face aux contraintes ergonomiques. La démarche a donc été abandonnée.

3.4.4 Appareil pour la protection de la tête.

Lorsque l'on cherche à détecter des obstacles en hauteur avec un capteur positionné sur la canne, la détection n'arrive qu'à un moment donné et s'arrête très peu de temps avant la collision avec la tête comme on peut le voir dans la Fig. 3.24.

Un capteur placé en badge fournit par contre une alarme non interrompue pour l'arrivée d'un obstacle en hauteur, Fig. 3.25.

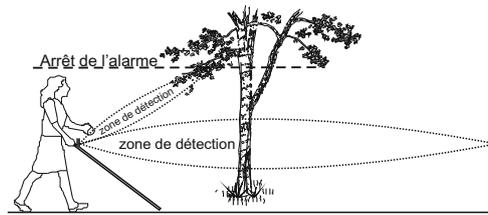


FIGURE 3.24: Appareil avec la protection de la tête

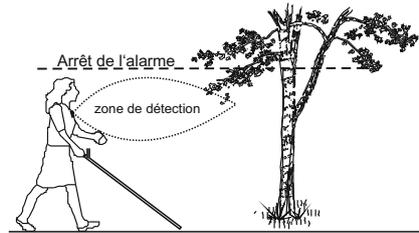


FIGURE 3.25: Appareil pour la protection de la tête

Nous avons réalisé quelques prototypes de détecteurs d'obstacles suspendus à hauteur de la tête basés sur le proximateur infrarouge (Fig. 3.26).



FIGURE 3.26: Prototype de la “tête haute”

Le dispositif pose un problème de positionnement : s’il n’est pas bien accroché aux vêtements, il ne détecte pas devant la personne. La difficulté la plus rédhibitoire a été la détection des branches fines dénuées de feuilles (ronces par exemple). La finesse de l’obstacle fait que la détection est tardive. Nous pensons compenser avec une puissance d’émission importante permettant de détecter les ronces “à temps”, ce qui a été fait mais alors, le champ de perception de l’appareil devient excessif lorsqu’on est face à un mur ou à une personne. Christian Coudeville, de notre équipe, a développé une approche à ultrasons qui s’est avérée plus satisfaisante pour une perception à 1,5 mètres.

3.4.5 *Minitacts* et fauteuil électrique

Le premier cas étudié est celui d'un utilisateur du *Tom Pouce* qui suite à la perte d'une jambe s'est retrouvé en chaise roulante en centre hospitalier long séjour. Il a souhaité retrouver une indépendance dans l'hôpital. On a effectué quelques essais sur place avec le matériel que nous avons de disponible sur l'étagère. Pour trouver le passage il y a eu deux approches : la première en utilisant l'appareil de protection de la tête porté au niveau du col (il n'y avait pas d'obstacles noirs fins dans l'hôpital), et la deuxième avec deux *Minitacts* placés de part et d'autre des roues. Avec les *Minitacts* en jouant sur les rotations à l'arrêt des deux roues on cherchait le passage là où aucun des deux appareils ne vibre. La directionnalité du faisceau des *Minitacts* a permis d'éviter correctement les pieds de chaise tout en trouvant le passage dans les couloirs étroits. La personne a préféré utiliser l'appareil de protection de la tête, il est moins performant que les deux *Minitacts* de part et d'autre des roues, mais cela lui permettait de changer de chaise sans avoir à faire de démontage. Actuellement la personne est équipée d'une prothèse et utilise le *Minitact* sur sa canne d'appui.

Le deuxième cas a été apporté par Aziz Zogaghi en contact avec les ergothérapeutes du centre d'aide aux enfants paralysés de Bailly. Il s'est lancé dans des essais d'aide au pilotage des fauteuils électriques avec des *Minitacts*. Suite aux différents essais avec deux *Minitacts* latéraux qui ont donné des résultats fonctionnels intéressants avec deux enfants, et aux essais que nous avons faits en essayant de piloter les chaises sous bandeau dans le centre, il est apparu qu'une disposition permettant de faire toutes les manœuvres dans les cas complexes de contournement devait comporter quatre capteurs. Deux appareils latéraux pointant vers l'avant et deux au niveau des roues arrière pour éviter que le fauteuil roulant ne se bloque pas dans des obstacles, Fig. 3.27.

Les alertes proviennent de deux vibreurs droite et gauche attachés aux jambes. Cependant, il reste un travail important à faire sur les champs de perception des 4 capteurs et la façon de transmettre l'information. Malgré l'intérêt porté au travail par les thérapeutes et les enfants concernés, nous n'avons pas inclus ce travail dans le cadre de la thèse et à notre regret nous avons dû le différer.

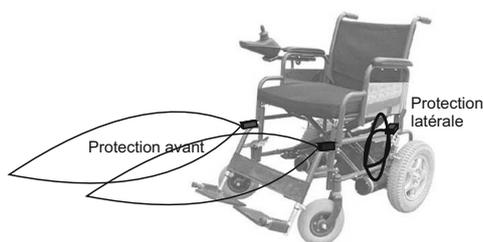


FIGURE 3.27: Configurations des *Minitacts* avec une chaise roulante



FIGURE 3.28: *Minitacts* fixés près des accoudoirs d'un fauteuil électrique

Un prototype a été testé au centre d'aide des enfants paralysés de Bailly avec des résultats encourageants, Fig. 3.28. L'enfant qui utilise habituellement une chaise roulante s'est montré plus à l'aise sur sa chaise roulante équipée de capteurs. Jusqu'alors, il n'arrivait pas à se déplacer et rouler dans un couloir sans toucher les murs et les colonnes. L'implantation des *Minitacts* lui permettait un déplacement beaucoup plus sûr et rapide. Cette expérience est faite comme une application alternative. Aucun appareil final n'a été implémenté ni aucune étude additionnelle n'a été réalisée, ceci ne faisant pas l'objet de cette thèse.

3.4.6 Détection d'obstacles avec le *Minitact* et le *Tom Pouce*

Nous terminons ce chapitre par la présentation du comportement des appareils finalisés diffusés auprès des non-voyants issus de ce travail, le *Tom Pouce II* et le *Minitact* en présence de configurations réelles typiques.

A la Fig. 3.29(a), on montre en rouge les directions donnant une alerte à l'utilisateur. Pour exemple, pour le contournement d'une voiture, on balaie l'appareil du point (A) au point (D) chaque direction visée est représenté par le signal interne de l'appareil, Fig. 3.29(b). Avec la portée de quatre mètres la voiture est détectée sur l'ensemble des directions représentées par la zone rouge.

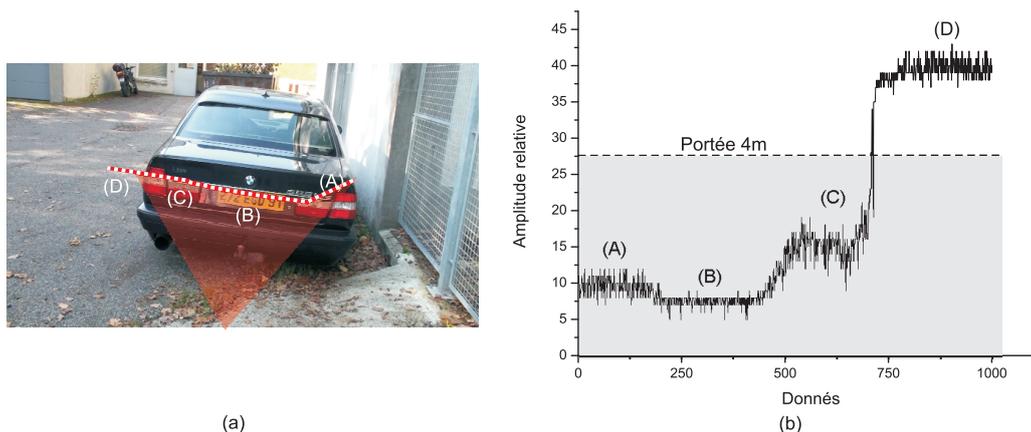


FIGURE 3.29: Signal de détection du *Tom Pouce II* au balayage

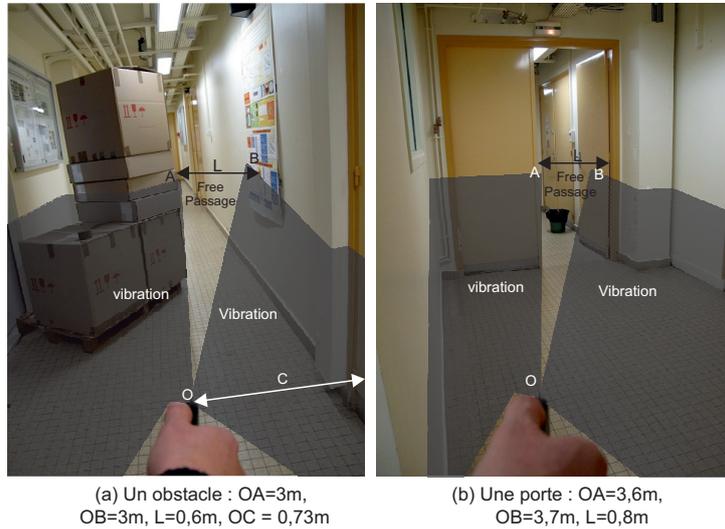
Minitact : situation typique de rétrécissement de couloir

FIGURE 3.30: Détection d'un passage

Les deux configurations illustrant les intérieurs sont le rétrécissement de passage et le passage de porte. Volontairement nous avons abordé ces configurations de biais afin d'augmenter la difficulté. La zone grisée sur les Fig. 3.30 (a) et (b) représente les directions de pointage de l'appareil générant des vibrations. La technique de mesure a été la suivante : l'utilisateur avance dans le couloir en balayant son *Minitact*. A partir du moment où il perçoit un changement dans la répartition angulaire des vibrations au cours du balayage, il s'arrête et on relève les directions avec et sans vibrations. La portée utilisée dans les deux exemples est de 4m. Dans la Fig. 3.30(a) on suppose que le passage est suffisamment large pour considérer que c'est d'un côté un mur latéral incliné et de l'autre un panneau latéral. Si le passage avait été plus étroit on aurait pris le modèle d'une ouverture. Pour le mur latéral du côté droit, le début de la vibration fait un angle de 76 deg avec le mur blanc (albédo = 1). Pour une portée de 4 mètres la courbe de la Fig. 3.18 (b) donne une distance au mur de 75 cm, en accord avec la mesure expérimentale à 2cm près. Pour la boîte en carton inclinée à 50 deg sur la gauche (albédo mesuré 0,92 à 950 nm), on la considère comme un panneau latéral d'albédo $0,92 \cos^2(50deg) = 0,4$ en tenant compte de l'inclinaison. La demi-largeur du faisceau à cette distance est de 1,5cm en accord avec la limite de vibration très proche de la tranche du carton. On peut refaire le même type de considérations pour la Fig. 3.30 (b).

Tom Pouce : configuration typiques d'extérieur

La Fig. 3.31(a) représente un suivi de mur avec ou sans poubelle. La différence d'angle de 8 deg due à la poubelle est clairement perceptible par l'utilisateur dans la mesure où cela correspond à plus du tiers de l'amplitude totale de balayage de la canne (20 deg).

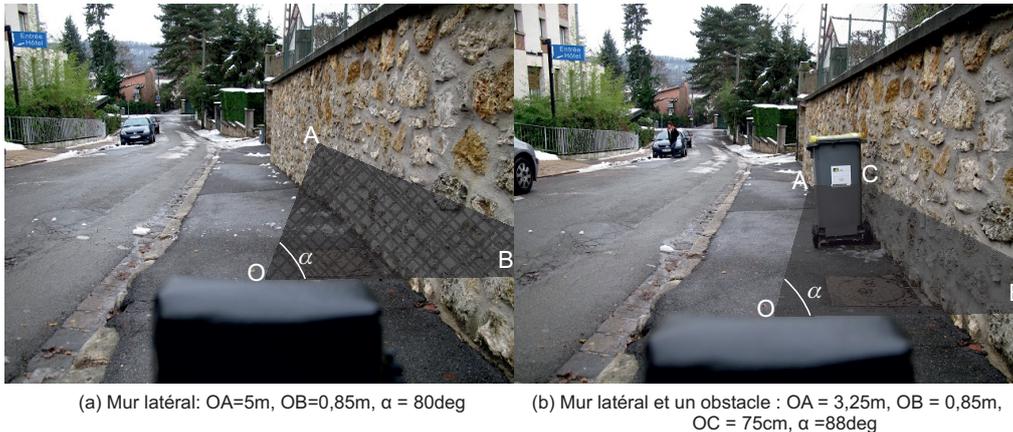


FIGURE 3.31: Suivi d'un mur



FIGURE 3.32: Détection d'une voiture

La Fig. 3.32 représente une voiture de face et de côté. Pour les voitures vues de face (Fig. 3.32(a)), la couleur de la voiture n'a pas d'importance. En effet le capot est très incliné, brillant et donc peu coopératif. La contribution principale au signal retour provient de la plaque d'immatriculation qui est un objet standardisé. Au moment de la détection de la voiture, les directions indiquées sans vibrations correspondent à un passage libre en ligne droite. Pour une voiture vue de côté, le passage indiqué en ligne droite est dirigé vers l'aile de la voiture. L'utilisateur va dévier une première fois, puis à nouveau quand il va se rapprocher de la voiture.

La trajectoire d'évitement va être une courbe incurvée vers la voiture. Ce type d'évitement ressemble à celui réalisé pour éviter un mur très large.

3.5 Bilan de liaison

Le rapport signal sur bruit adapté à notre contexte d'utilisation est de six (probabilité de détection 0,95 et probabilité de fausse alerte 5×10^{-5}). Il correspond à une valeur de l'éclairement de $2,5 \times 10^{-4} W/m^2$. Le bilan de liaison du *Minitact* avec une portée de six mètres, pour la détection d'un obstacle de $1m \times 2m$ est montré en la Fig. 3.33. Ce bilan est établi à partir de l'équation (3.3) en utilisant un seuil à $2,5 \times 10^{-4} W/m^2$

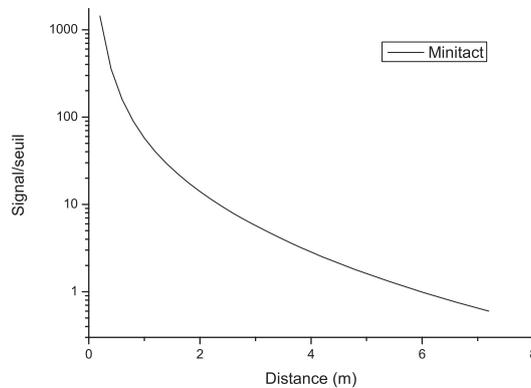


FIGURE 3.33: Bilan de liaison du *Minitact*

Pour une luminosité de $50klux$, le bruit est multiplié par cinq, les tirs sont plus intenses pour maintenir le même rapport signal sur bruit.

3.6 Sécurité oculaire

Les appareils de détection d'obstacles doivent respecter les normes de sécurité oculaire en vigueur pour éviter des lésions sur l'entourage de l'utilisateur non-voyant. Selon la norme française NF C 43-801 il y a plusieurs critères de classement d'une source de rayonnement. Nous avons retenu les deux conditions les plus restrictives dans notre configuration pour satisfaire la classe I. Nous avons vu dans le principe de fonctionnement du proximètre infrarouge qu'il émet des impulsions de puissance croissante jusqu'à la détection du signal retour qui stoppe l'émission. On se place dans le cas extrême où cette sécurité active ne fonctionnerait pas, et où la puissance maximale possible serait émise vers un œil placé de manière permanente près du boîtier en face de l'émetteur.

- “L'exposition à l'une quelconque des impulsions faisant partie du train ne doit pas dépasser les limites d'émission accessibles (LEA)”.

- “La puissance moyenne pour un train d’impulsions de durée T ne doit pas dépasser la puissance correspondant à la LEA respectivement pour une impulsion unique de durée T ”.

Les mesures de référence sont faites avec le radiomètre Thorlab PM 100, le diamètre de la cellule de mesure est de 9mm (supérieur à celui de la pupille dilatée de 7mm retenue pour appliquer les normes).

La puissance moyenne mesurée à la sortie de l’appareil sur la durée maximale du train d’impulsions ($450\mu s$) est de 1,58mW et l’énergie est $7,1 \times 10^{-7} J$ L’énergie maximale autorisée est de $2,5 \times 10^{-6} J$.

Par ailleurs l’énergie du pulse de puissance la plus élevée est de $4,9 \times 10^{-8} J$ et le maximum permis est de $1,5 \times 10^{-7} J$.

Si on mesure la puissance moyenne sur une durée de 1s ou plus, la valeur obtenue est de $70\mu W$ et la valeur maximale est de $0,24mW$.

A titre indicatif quand le dispositif de réception est laissé dans son fonctionnement normal, la puissance moyenne reçue pour un œil à 1 cm du boîtier est de $1\mu W$ en moyenne. Le dispositif est largement dans les normes de sécurité oculaire.

3.7 Conclusion

La proximité infrarouge est la seule technique utilisée pour ces deux dispositifs diffusés auprès des non-voyants : le *Minitact* et le *Tom Pouce*. Elle présente donc un compromis attractif à cause de la robustesse du capteur peu sensible aux dérèglages optiques micrométriques, d’un bon comportement face aux voitures dans les configurations courantes, d’une bonne gestion des couloirs, des arbres ou poteaux, etc. Le principal point négatif reste la non détection avec une anticipation suffisante des poteaux fins noirs brillants anti stationnement. Dans le cadre de ce travail de thèse on a effectué les calculs permettant de déterminer le champ de perception et de l’optimiser. L’optimisation est faite en variant les paramètres de l’émetteur pour les trois configurations de panneaux. Les améliorations faites ont été implantées dans le *Tom Pouce II* qui est l’évolution du *Tom Pouce I*. On a également tenté des nouvelles approches d’utilisation du proximateur infrarouge, certaines ayant réussi (*Minitact*), d’autres étant en bonne voie (capteur pour fauteuil électrique) et d’autres abandonnées (appareils pour la protection de la tête et le bas du sol).

Chapitre 4

La télémétrie laser

4.1 Introduction

Dans la recherche du meilleur compromis entre les performances fonctionnelles du non-voyant dans le déplacement et l'effort cognitif associé, on a développé le proximètre infrarouge qui donne une alerte en présence d'un obstacle. Le proximètre infrarouge détecte des obstacles jusqu'à six mètres et donne une protection de la largeur des épaules (Chap. 3). A la différence, la télémétrie laser est destinée à détecter des obstacles fins. La complémentarité de ces deux techniques doit donner au non-voyant la capacité d'évitement de tout type d'obstacles.

4.1.1 Types de télémètres laser

On peut classer les télémètres laser en trois catégories : l'interférométrie, les mesures par déphasage et la triangulation [55, 56].

L'**interférométrie optique** permet de mesurer des déplacements avec une précision nanométrique. Elle utilise l'interférométrie de Michelson comme principe de base. Ce dispositif est surtout adapté à la mesure des déplacements micrométriques et non à la mesure des distances absolues de l'ordre du mètre sur des structures diffusantes.

Les **mesures par déphasage** englobent la technique du temps du vol et la modulation en fréquence et/ou amplitude du faisceau.

- La technique du *temps de vol* est basée sur la mesure du temps de propagation de la lumière entre la source et la cible (aller retour). Lorsque la lumière est émise, un chronomètre est déclenché et lorsque la lumière retour

arrive au détecteur, il est arrêté. La distance L à la cible est donnée par :

$$L = c\tau/2$$

c est la vitesse de propagation et τ le temps d'aller retour de la lumière. C'est la technique la mieux adaptée à la mesure des distances longues de l'ordre du kilomètre sur des surfaces non coopératives dans le cadre de la sécurité oculaire.

- La *modulation par amplitude* utilise un faisceau laser au régime continu. Le système envoie un faisceau laser vers un obstacle, une partie est rétrodiffusée et détectée. La distance est déduite de la comparaison entre la phase de l'onde émise et celle renvoyée. Cette méthode permet de mesurer une distance de l'ordre du km sur une cible coopérative (coin de cube) avec une précision de l'ordre du millimètre, la portée maximale pour un dispositif à sécurité oculaire est d'une dizaine de mètres sur une surface non coopérative.
- La mesure de distance par *modulation en fréquence (FMCW)* utilise actuellement une diode laser. La fréquence est modulée avec un signal triangulaire ou sinusoïdal. Le signal reçu a un retard temporel par rapport au signal émis. La sommation de le deux signaux génère un battement. La distance dépend de la fréquence du battement et de la bande passante de modulation. La portée de mesure est communément d'une vingtaine de mètres.

Le télémètre laser à triangulation est constitué par une diode laser qui envoie un faisceau et rencontre l'obstacle en un point. La lumière reflétée est collectée par une lentille qui forme une image sur un détecteur linéaire. L'image est formée sur l'axe de la lentille quand l'objet est à l'infini. Au fur et à mesure que l'obstacle s'approche du télémètre, l'image s'éloigne de l'axe optique. Ainsi la distance de l'obstacle peut être déduite de la position de l'image. Cette technique permet de mesurer des distances dans une plage allant de quelques centimètres à quelques mètres. La précision décroît avec la distance à mesurer.

4.1.2 Expériences acquises sur les télémètres avant cette thèse

L'équipe utilise la télémétrie laser à triangulation depuis 1996 dans les dispositifs appelés *Téléfact I* et *II* et la proximétrie infrarouge seule depuis 1999 avec le *Tom Pouce I*. Les avis des utilisateurs ont permis de faire un bilan des points forts et faibles de la télémétrie laser par rapport à la proximétrie infrarouge.

Points forts du télémètre laser :

1. Il détecte les poteaux anti stationnement qui sont noirs fins et brillants.
2. Il ne surestime pas la distance pour les panneaux cataphotes, contrairement aux dispositifs infrarouges.
3. Il a une échelle de distance fine et précise ; il permet la perception des profils des obstacles aidant à leur identification.

4. Il a la possibilité d'atteindre une portée de 15 m.

Points faibles :

1. *L'appareil ne détecte pas une chaise basse* : le dispositif étant fixé à la canne et explorant le plan horizontal, il passe au dessus de la chaise.
2. *Trop d'informations à gérer* : il a une échelle de distances fines et précises et l'analyse de nombreux détails est un surplus d'informations non essentielles au déplacement (détails des grilles, des feuillages, les petits décrochements de murs, etc.).
3. *Le dispositif est mécaniquement fragile* : l'appareil est attaché au niveau de la poignée de la canne et est en permanence soumis aux vibrations de la canne qui frotte le sol. Lorsque la canne est posée contre un mur pour rangement et mal calée, la chute pour le télémètre est de plus de un mètre de hauteur et peut porter préjudice aux réglages optiques.
4. *Réduction de la portée en plein soleil* : la portée maximale doit être réduite à 8m en plein soleil.

Pour surmonter ces points faibles, la conception d'un nouvel appareil a été envisagée.

4.1.3 Systèmes alternatifs à évaluer

Mono-faisceau ou monopoint

L'interférométrie optique est exclue car elle ne concerne que des déplacements trop petits dans notre contexte.

Les télémètres laser à comparaison de phase sont très lents pour les obstacles fonceés (de l'ordre de la seconde). Pour notre besoin la cadence minimale doit être de vingt mesures par seconde au moins.

La technique du temps de vol requiert un laser à impulsions d'une durée de l'ordre de la nanoseconde et une photodiode à avalanche pour la détection. La mesure du temps doit être très précise, une nanoseconde représentant une longueur de 15 cm. Ce type de mesure temporelle s'effectue : soit avec des techniques de double vernier [57] ou soit par le biais d'un échantillonnage à plusieurs gigahertz. La technique de double vernier permet d'obtenir une précision de quelques centimètres et l'échantillonnage permet d'atteindre une précision sub-centimétrique.

Grâce à la courte durée des impulsions laser, il est possible d'émettre des pulses de puissance instantanée élevée (de l'ordre de 20W dans le cadre de la sécurité oculaire). La télémétrie à temps de vol est la technique permettant d'atteindre les plus grandes portées, plusieurs centaines de mètres sur des cibles non coopératives.

On pourrait envisager avec cette technique d'étaler le faisceau verticalement tout en conservant une portée supérieure à 10m. L'appareil étant fixé sur la canne à environ un mètre du sol, on peut envisager d'étaler le faisceau de bas en haut

dans le plan vertical afin de récupérer les obstacles situés en dessous et au dessus du plan horizontal.

Cette démarche est limitée car si on veut conserver une portée de 15m, il faut que le faisceau ne touche pas le sol à cette distance.

L'angle vers le bas est donc limité à 3,5 deg. Il en est de même pour la protection en hauteur qui ne doit pas dépasser 2m sous peine de générer de fausses alertes. Le faisceau est donc au maximum étalé verticalement sur un angle de 7 deg.

Si les obstacles sont perçus 15m à l'avance, ils sont analysés globalement de haut en bas (90 cm au dessus et au dessous de l'horizontale à 1m de hauteur). Par contre tous les obstacles ne sont pas analysés avec 15m d'avance, par exemple les obstacles situés 2 ou 3 m après un tournant ne sont vus au mieux qu'avec deux ou trois mètres d'anticipation. La hauteur du trait vertical est alors de 30 cm, 15 cm de part et d'autre de l'horizontale et l'effet de protection haut bas est limité, Fig. 4.1.

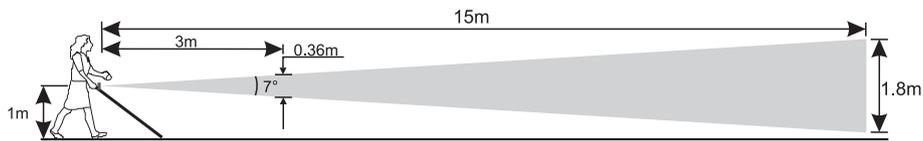


FIGURE 4.1: Système avec balayage vertical

Sur le plan de la robustesse mécanique, la technique ne nécessite pas de réglages fins. Par contre l'électronique implique une amplification haute fréquence à fort gain et un échantillonnage GHz très difficile à intégrer dans un faible volume à cause des rétroactions inductives parasites.

L'approche télémétrique monofaisceau à temps de vol présente des complications importantes concernant l'électronique et le bilan de consommation énergétique sans apports clairs décisifs par rapport au télémètre à triangulation.

Les systèmes multipoints

On peut envisager la possibilité d'un système multipoints comme le scanner laser ou la caméra 3D prélevant automatiquement un profil de l'environnement. Nous excluons les dispositifs basés sur deux caméras, car outre les problèmes non résolus d'analyse des données en temps réel, le dispositif ne fonctionnerait pas correctement de nuit. L'association d'un télémètre à temps de vol et d'un système à balayage type scanner deux axes permettrait de générer un volume de protection de forme totalement contrôlable. En revanche cela n'est pas envisageable dans les contraintes d'encombrement, de robustesse et de consommation du dispositif. Le champ de balayage nécessaire pour protéger latéralement la personne aux distances courtes est trop élevé pour les modulateurs acousto-optiques et nécessite

un dispositif mécanique à miroirs. La cadence des mesures pour un balayage du volume complet du cylindre de protection doit être au moins de 20Hz, l'obtention d'un nombre de points suffisant pour couvrir un volume de protection de façon "cylindrique" est d'au moins 400. Une fréquence de mesure de l'ordre de 10kHz serait à envisager. C'est tout à fait possible mais énergétiquement trop défavorable. Les parties tournantes mécaniques sont une source de poids, de vibrations, de consommation et de fragilité.

Une caméra 3D à temps de vol comporte une source divergente pulsée éclairant le champ de la caméra. Chaque pixel du récepteur contient un dispositif de mesure du temps entre l'émission du pulse et sa réception. La caméra mesure la distance dans chaque direction matérialisée par chaque pixel.

L'approche caméra à temps de vol est une alternative au scanner permettant un contrôle du volume de protection sans parties mécaniques. Par exemple, la caméra à temps de vol existante qui est la plus proche de nos besoins est le modèle SR400015 de Mesa Imaging [58]. Sa portée est de 10m, la précision de $\pm 1,5\text{cm}$, son champ de 69deg (h) par 56deg (v), sa résolution angulaire de 0,39 deg par 0,24deg est largement suffisante pour faire une mise en forme complète du faisceau de protection des pieds à la tête à partir d'une distance de 1,5m.

Un certain nombre de points rendent cependant toujours cette technique inutilisable dans notre contexte :

- La caméra ne fonctionne plus correctement pour une luminosité ambiante supérieure à 20klux, sachant que les 80klux sont couramment dépassés les jours ensoleillés.
- La consommation est de 800mA sous 12V, soit 9,6W, c'est à dire moins de 15 minutes de fonctionnement (sans compter l'alimentation du reste du dispositif) avec 2 batteries AAA rechargeables (ce qui est notre référence en matière d'autonomie).
- Le volume du capteur est de 300cm^3 , à comparer avec le capteur infrarouge à $1,5\text{cm}^3$ et l'objectif de 6cm^3 sur le capteur laser à triangulation.
- Le poids est de 450g alors que le capteur infrarouge est à 4g et le laser à triangulation inférieur à 20g.

Même si l'approche caméra à temps de vol est séduisante sur le principe, il y a trop d'ordres de grandeur à gagner sur cette technologie pour envisager son adaptation à court ou moyen terme.

Conclusion

L'approche a donc été de surmonter les limitations de notre capteur infrarouge en continuant sur la voie de la triangulation laser. Les enjeux sont d'éliminer la limitation de portée de 8m en plein soleil, d'améliorer la compacité et la robustesse mécanique, de capter les obstacles horizontaux, bas et haut dont la structure fine et foncée peut échapper au capteur infrarouge.

4.2 La triangulation laser

4.2.1 Principe de fonctionnement

Un télémètre à triangulation laser est composé d'une source de lumière, d'une lentille et d'un photodétecteur linéaire. Le laser émet un faisceau en direction de l'obstacle. L'obstacle diffuse la lumière. La lentille collecte la partie rétrodiffusée du flux lumineux dans la direction de l'obstacle et le concentre vers un détecteur de position linéaire. La position du point de focalisation sur le détecteur est déterminée par x , Fig. 4.2.

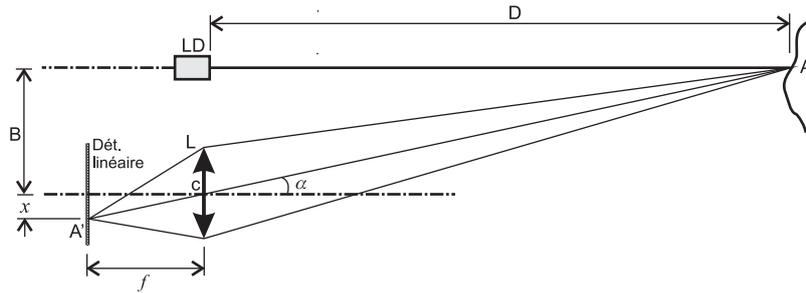


FIGURE 4.2: Diagramme de base de la triangulation laser

La distance D est déduite à partir des relations géométriques de la Fig. 4.2 :

$$D = f \frac{B}{x} \quad (4.1)$$

La distance D est inversement proportionnelle à la position du point de focalisation x . La mise au point est faite pour une distance particulière de référence D_r . Les distances plus éloignées ou rapprochées présentent une défocalisation. De plus l'image étant hors de l'axe du système optique, il se forme une aberration de coma. Une étude empirique a été faite par Jules Carpentier en 1901 [59] et plus formellement en 1904 par Theodore Scheimpflug [60] qui décrit un moyen pour résoudre cette difficulté. Il est connu sous le nom de "condition de Scheimpflug".

4.2.2 Condition de Scheimpflug

Dans la Fig. 4.2, l'image de l'objet A sur le capteur, ne sera pas focalisée sur le capteur si l'obstacle se trouve plus près ou plus loin que la distance D . Une configuration géométrique est énoncée par Scheimpflug [60, 55] qui permet d'avoir le point laser focalisé sur le détecteur dans toutes les plages de détection. Scheimpflug a défini un angle d'inclinaison pour le détecteur linéaire (Fig. 4.3) :

$$\beta = \arcsin\left(\frac{f}{J}\right) \quad (4.2)$$

Où f est la distance focale et J est la distance entre les points P_1 et P_2 , Fig. 4.3.

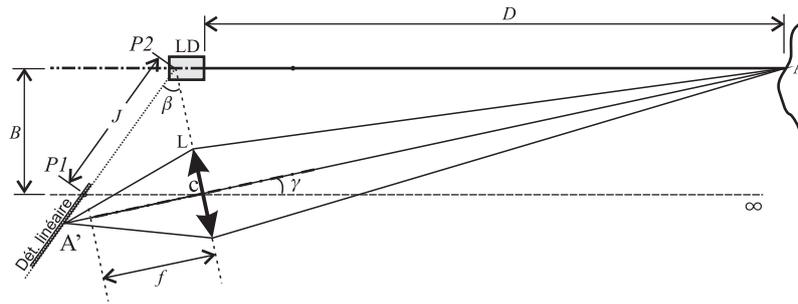


FIGURE 4.3: Construction géométrique de la condition Scheimpflug

4.2.3 Erreur absolue (hors Scheimpflug)

La détection est faite expérimentalement avec un détecteur linéaire de largeur de pixel Δx . Les erreurs sont déterminées par :

$$\Delta D = \frac{D^2}{fB} \Delta x \quad (4.3)$$

L'incertitude sur la mesure augmente comme le carré de la distance pour des paramètres fixés : base B et distance focale de la lentille f .

4.2.4 Compromis de conception de la tête optique

On cherche à gagner sur la robustesse du capteur en le rendant plus compact. Cela implique la réduction de la base B et de la distance focale f de l'objectif. Donc, plus les dimensions mécaniques seront petites, plus la précision sur la mesure de la distance sera faible (voir équation (4.3)).

- Si on se réfère à l'utilisation du *Tom Pouce I* fonctionnant avec un seul niveau d'alerte correspondant à une portée de 0,8m, 2m ou 4m, selon le choix de l'utilisateur, les besoins en précision sont faibles.
- Si on se réfère à l'utilisation du *Téléact II*, à plus de 10m de distance une précision de 1, 2 voire 3 mètres est largement suffisante. En effet à ces distances on cherche surtout à détecter un grand axe dégagé, ou à analyser la présence d'un mur de l'autre côté d'une rue à traverser.
- Aux courtes distances la résolution de la triangulation laser est bonne et celle du *Téléact II* a toujours été supérieure aux besoins.

Nous allons donc nous orienter vers les dimensions minimales autorisées par la mécanique et voir ensuite si elles ne sont pas incompatibles avec l'utilisation.

L'objectif

Afin d'avoir le maximum de flux sur le minimum de cellules sur la barrette CMOS pour optimiser la portée, il est important d'avoir un objectif ouvert de

bonne qualité. On s'est orienté vers les objectifs de caméra miniature largement industrialisés et comprenant de 3 à 6 éléments suivant les distances focales. Leurs dimensions sont standards et dépendent peu de la distance focale dans la plage 2,6mm à 12mm. Nous choisissons donc une focale de 12mm avec un diamètre d'ouverture de 6mm (le plus grand trouvé), configuration la plus favorable à la précision et au flux collecté sans répercussions sur le volume du capteur.

Le détecteur

La précision du système dépend des caractéristiques du détecteur qui peuvent être : une photodiode de surface sensible à la position PSD (Position Sensitive Device) ou un détecteur linéaire, soit CCD ou CMOS. Tous ces détecteurs sont à base de silicium et ont une sensibilité voisine à savoir de l'ordre de 0,6A/W.

La photodiode PSD (Position Sensitive Detector) : Le PSD a été très utilisé par l'industrie des détecteurs de déplacement. La raison principale est la résolution de ce capteur sensible à des déplacements de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres contre quelques micromètres pour les capteurs CCD et CMOS. Le principal problème rencontré est que les PSD donnent la position du barycentre de l'éclairement sur la surface. Dans des conditions de forte luminosité ambiante, la contribution de la lumière ambiante au barycentre est couramment très supérieure à celle du signal laser à sécurité oculaire (même après le meilleur des filtrages interférentiels). Cela n'est pas gênant si le fond ambiant est stable, on peut remonter au signal par modulation. Le problème est que le capteur placé sur la canne se déplace en permanence et fait varier le fond lumineux ambiant de manière aléatoire. Le signal est totalement parasité par la lumière ambiante. Il est impossible de remonter à la distance.

La barrette CCD : Les dispositifs à transfert de charge CCD sont très performants dans un vaste domaine d'applications. Les charges générées par la lumière reçue, pendant un temps d'exposition, sont déplacées vers un registre série de stockage et ensuite envoyées à la sortie. Le transfert de charge implique plusieurs signaux d'horloge et aussi plusieurs sources d'alimentation. La dynamique d'un capteur est liée à la taille du pixel (capacitif) et à sa température : s'ils sont plus gros ils doivent avoir une plus grande dynamique. En fait, les pixels ont une taille comprise entre $6,5\mu m$ et $15\mu m$ et une dynamique moyenne de 40db à température ambiante. Si on veut augmenter la dynamique il est nécessaire de refroidir le capteur par effet Peltier, ce qui ne nous est pas possible pour des raisons de consommation. Les capteurs CCD ont été utilisés dans le *Téléact I* et les performances du télémètre étaient limitées par la dynamique du capteur. Actuellement le choix des capteurs CCD s'est fortement réduit et ils n'existent pas en version CMS compacte.

La barrette CMOS : Contrairement au CCD, le capteur CMOS avait une mauvaise réputation provoquée par son bruit trop élevé. Aujourd'hui il est aussi performant que les CCD et présente une meilleure dynamique à température ambiante. La possibilité d'implantation du traitement de signal dans le même capteur permet de réduire sa taille. Les signaux de contrôle sont réduits au nombre de deux ou trois et l'alimentation est de 3V. La taille de chaque pixel varie entre fabricants mais elle se situe en moyenne autour de $5\mu\text{m}$.

Pour notre télémètre, une barrette CMOS de petite taille avec une dynamique de 67dB a été choisie. Le RPLIS 2048 de Panavision SVI a une taille de pixel de $4\mu\text{m} \times 32\mu\text{m}$ et un pas de $4\mu\text{m}$. C'est le composant qui possède le pas minimal par rapport aux barrettes CMOS disponibles dans le marché.

L'incertitude de mesure

La séparation minimale mécanique B entre l'axe de l'objectif et le laser, est de 10mm. Elle est due au diamètre de l'optique d'un demi pouce, soit un rayon de 6,2mm et à une diode laser de rayon 3mm. La séparation de 9,2mm a été arrondie à 10 mm pour laisser un peu de matière entre l'optique et la diode laser. La détection est faite avec une CMOS linéaire de $4\mu\text{m}$ de pitch, la mesure de la distance D à partir de x dépend de l'équation (4.1) et les erreurs absolues sont déterminées par l'équation (4.3). L'incertitude en fonction de la distance mesurée est montrée dans la Fig. 4.4

Pour des distances inférieures à 4m, l'incertitude est inférieure à 30cm, mais elle augmente jusqu'à $\pm 1,5\text{m}$ à 10m.

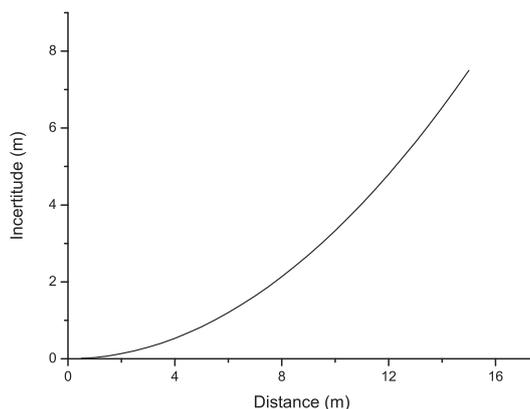


FIGURE 4.4: Relation théorique de l'incertitude de mesure en fonction de la position de l'obstacle

Le laser

La diode laser devrait avoir de préférence une longueur d'onde en dehors du spectre visible pour la discrétion de l'utilisation et être de taille la plus petite possible. Par contre le meilleur rapport signal sur bruit dans le cadre de la sécurité oculaire reste le critère prioritaire de choix.

Une diode laser de plus de 700nm de longueur d'onde d'émission se trouve limitée à 0,15mW de puissance continue pour être en classe I selon la norme internationale CEI 60825-1 [61]. Au-delà de cette valeur le laser se retrouve en classe IIIA. Par contre pour une longueur d'onde dans le visible on peut bénéficier d'un mW de puissance continue dans le cadre de la classe II, classe tolérée dans les utilisations pour le grand public. En plein soleil, ce rapport 6 de puissance reste utile, sans lui il ne serait pas possible avec les moyens que nous savons mettre en œuvre d'assurer une portée supérieure à 10 mètres en plein soleil sur tout type de surface, notamment les surfaces blanches en crépis (produisant des contrastes soleil ombre très forts à cause du grain). Nous utilisons donc une longueur d'onde d'émission de 650nm.

Le filtre

Les diodes lasers utilisées à 650 nm ont une dispersion de 4 à 5 nm à l'intérieur d'une même série, et une variation de 1 à 2 nm de leur longueur d'onde d'émission au cours des premières minutes d'allumage. Un filtre interférentiel standard de largeur spectrale 10nm est utilisé.

4.2.5 La structure mécanique de la tête optique

La portée du télémètre est optimisée pour détecter des obstacles depuis un mètre jusqu'à dix mètres. La portée est beaucoup plus grande que la base B qui est de 10mm soit 0,01m. Ainsi, l'axe de la lentille tend à être parallèle à l'axe du laser. Avec un objectif de 12mm de distance focale, l'angle de Scheimpflug peut être considéré comme $\beta = \arctan(B/f)$. L'angle est alors de 40 degrés. Introduire un tel angle entraîne une complication mécanique. Nous allons analyser si cela est utile.

Nous prenons la configuration de la Fig. 4.2. Dans le tableau 4.1, la barrette est placée dans le plan image correspondant à un objet éloigné de 3,5m. On calcule la taille de l'image dans le plan de la barrette en négligeant les aberrations, Fig. 4.5. Le relevé expérimental des tailles images montrera si la qualité de l'objectif est suffisante pour faire cette approximation. Cette taille image est due à la dimension géométrique du spot laser et à la défocalisation.

Equations utilisées dans la Table 4.1 :

Equation des lentilles minces : $1/f = 1/d_o + 1/d_i$

Défocalisation axiale : $\delta d_i = |d_{i3.5m} - d_i|$

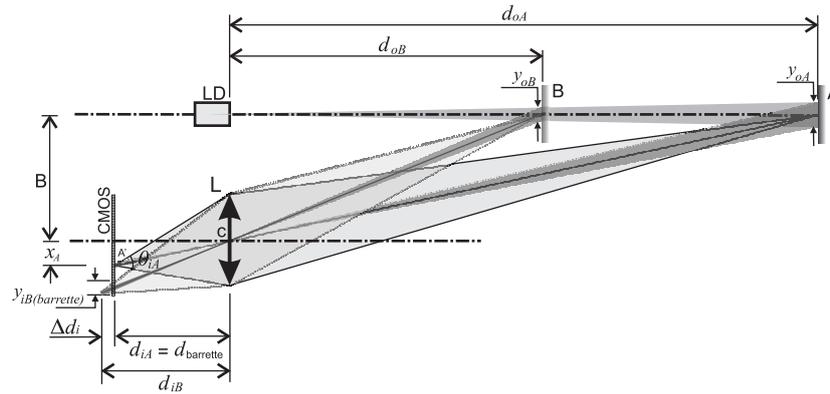


FIGURE 4.5: Schéma servant à déterminer la taille de l'image

Distance $D(m)$	Défocalisation axiale $\Delta d_i =$ $ d_{iA} - d_{iB} $ (μm)	Taille du spot image $y_i(\mu m)$ dans le plan image	Défocalisation ponctuelle dans le plan de la barrette (μm)	Taille totale du spot dans le plan de la barrette $y_{i\text{barrette}}(\mu m)$
1	104,5	36,6	25,8	62,4
2	31,2	18,4	7,7	26,2
3,5	0	10,7	0	10,9
4	5,2	9,6	1,3	10,9
6	17,2	6,9	4,3	11,2
8	23,3	5,6	5,8	11,5
10	26,9	5,0	6,7	11,7
12	29,3	4,5	7,3	11,8
14	31,0	4,3	7,7	12
16	32,3	4,1	8,0	12,1

TABLE 4.1: Données sur la défocalisation en fonction de la distance

Taille du spot laser sur l'obstacle : $y_0 = 1.5 \times 10^{-3} \sqrt{1 + (d_0/10.6)^2}$

Taille du spot : $y_i = -\frac{d_{iA}}{d_o} y_0$

Défocalisation ponctuelle : $def = \theta_i \Delta d_i$

Taille totale du spot sur la barrette : $y_{i\text{-barrette}} = |y_i| + def$

D'après la table 4.1, on remarque que la taille du spot dans le plan image diffère peu de sa taille sur la barrette entre 2 et 4m. La condition de Scheimpflug qui égaliserait la taille du spot dans le plan image et dans celui de la barrette n'a donc pas d'intérêt. Pour les distances supérieures à 4m nous avons deux contraintes qui seront détaillées plus tard, la résolution et le flux d'énergie collecté sur chaque pixel. Nous remarquons que la taille du spot sur la barrette est 2 à 3 fois plus grande que dans le plan image et que dans ce dernier cas la taille du spot est de l'ordre du pixel ($4\mu m$). Si nous souhaitons améliorer la résolution par interpola-

Distance $D(m)$	Taille de spot laser sur l'objet y_0 (mm)	Taille totale du spot dans le plan de la barrette calculé $y_{i\text{barrette}}$ (μm)	Taille totale du spot dans le plan de la barrette mesuré (μm)
1	2,5	62,4	64
2	4	26,2	34
3,5	5,2	10,9	18
4	6	10,9	12
6	10,8	11,2	10

TABLE 4.2: Données expérimentales sur la défocalisation

tion, nous avons intérêt à avoir des tâches images de plusieurs pixels et pour cela éviter la condition de Scheimpflug. Par ailleurs les pixels étant allongés ($4 \times 32 \mu\text{m}$) à 16m, on ne perd qu'un facteur 3 en flux collecté par pixel. Nous verrons par la suite que malgré cela nous avons suffisamment de flux aux grandes distances. Finalement aux distances inférieures à 2m nous avons du flux et de la résolution en excès et donc pas de besoins d'optimisation. Pour l'ensemble de ces raisons la configuration de Scheimpflug est une complication mécanique ne présentant pas d'avantages dans notre contexte.

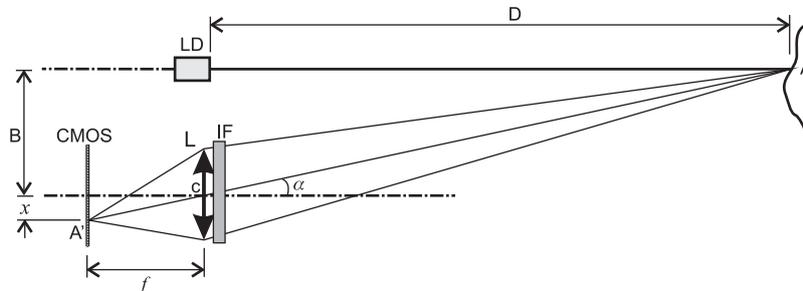


FIGURE 4.6: Schéma final de la tête optique

Dans la Fig. 4.6, B est la base (10mm), L l'objectif ($f = 12\text{mm}$), IF le filtre interférentiel, LD la diode laser et x la position de l'image A' sur la barrette.

4.2.6 La barrette CMOS

Principe de fonctionnement :

La barrette CMOS est un ensemble matriciel de détecteurs de "metal oxide semi-conducteurs". Chaque pixel accumule une charge qui est proportionnelle au

nombre de photons reçu pendant un temps d'exposition¹.

La CMOS RPLIS 2048 de Panavision SVI (Fig. 4.7) a seulement deux signaux de contrôle : le signal de l'horloge, CLK et le signal de start, STRT (Fig. 4.8). Le temps d'exposition commence après la lecture des derniers pixels de la barrette et s'arrête au premier de la lecture suivante. Il n'y a pas d'information captée pendant la lecture de la barrette ("zone" aveugle), Fig. 4.8.

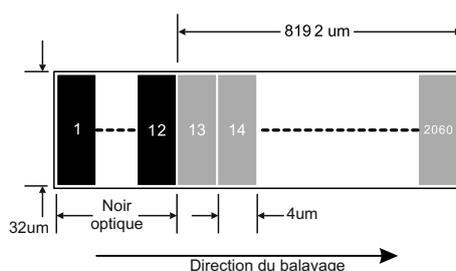


FIGURE 4.7: Détail de la CMOS

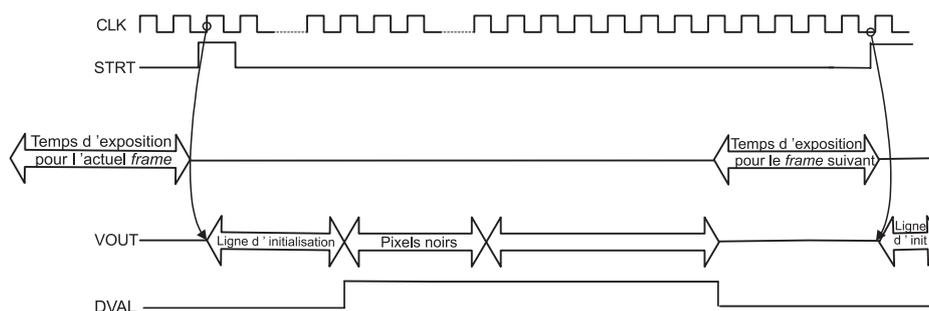


FIGURE 4.8: Diagramme temporel de contrôle de la barrette CMOS

Temps d'exposition :

Le temps nécessaire pour accumuler les charges produites par l'éclairement sur les capteurs CMOS est le temps d'exposition. Le temps d'exposition commence quand le signal DVAL (Fig. 4.8) descend à zéro ou après la dernière lecture de pixels et de l'impulsion start STRT suivante.

La réponse linéaire du capteur par rapport au temps d'exposition a été vérifiée et les résultats sont montrés dans la Fig. 4.9.

1. Le temps d'exposition désigne l'intervalle de temps pendant lequel l'obturateur électronique de l'appareil laisse passer la lumière, et donc le temps d'exposition du capteur.

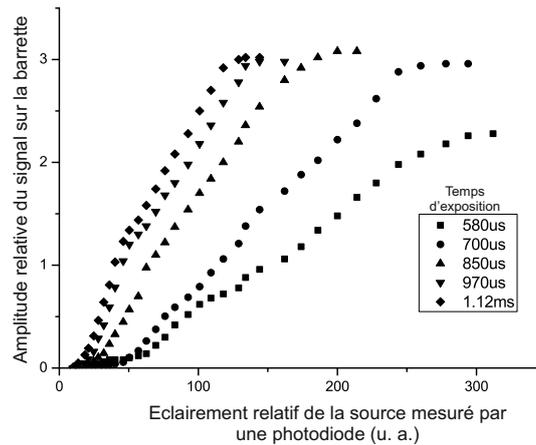
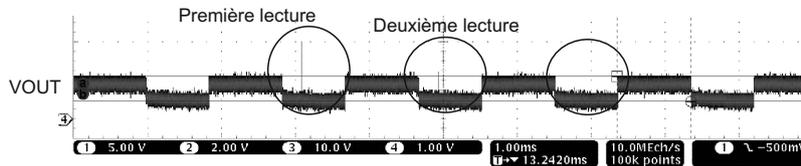


FIGURE 4.9: Réponse de la barrette pour différentes valeur de temps d'exposition

Le signal de trainée (*lag*) :

La quantité de signal résiduel dans les pixels après une lecture est appelée *lag*. Nous évoquons ce point car les valeurs expérimentales du *lag* trouvées sont bien supérieures à celles annoncées dans la notice du constructeur, ce dernier n'ayant pas pu fournir d'explications. Pour mesurer le phénomène, on fait une première mesure de l'image du spot laser, on éteint le laser et on reprend la mesure. Le rapport des amplitudes du pic avec laser et du pic résiduel obtenu sans laser permet de remonter au *lag*. L'image du pic avec laser est à 50% de la valeur de l'amplitude de saturation (Fig. 4.10) VOUT qui vaut 1,1V.

FIGURE 4.10: Mesure du *lag* de la CMOS

A la deuxième lecture le signal laser a une amplitude de 0.52V, ce qui donne un *lag* d'environ 50% en contradiction avec les 5% de la *data sheet* (tension d'alimentation de la barrette 2,7V).

Cette valeur peut causer des problèmes de détection puisque la fin d'un obstacle n'est perçue que deux mesures plus tard.

4.2.7 Amélioration de la précision par interpolation

La distance à l'obstacle est obtenue en recherchant le centre de l'image sur le signal de sortie VOUT de la barrette et en utilisant l'équation 4.1. La forme typique de VOUT est montrée dans la Fig. 4.11. On considère dans un premier

temps que le centre de l'image correspond à la valeur du pixel ayant l'amplitude maximale.

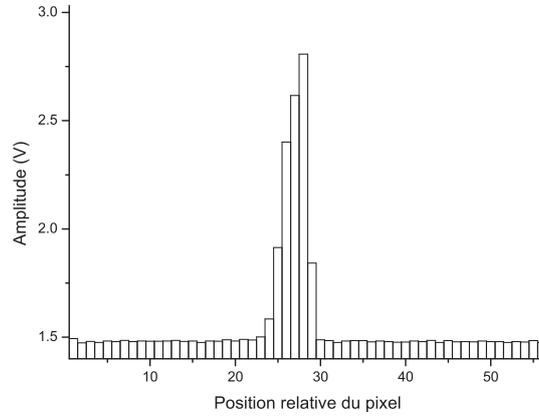


FIGURE 4.11: Signal VOUT de la CMOS.

La valeur de x dans l'équation (4.1) est déterminée sachant que l'intervalle entre pixels est de $4\mu\text{m}$.

En utilisant la relation (4.1) la distance à l'obstacle est calculée. Par exemple pour le pixel 28, x prend la valeur de $28 \times 4\mu\text{m}$ et en utilisant les valeurs de distance focale et de distance de séparation B du paragraphe 4.2.5, il en résulte que la distance D est égale à 1m. Les données expérimentales sont montrées à la Fig. 4.12 avec une cible standard (étalon) de 99% de réflectivité. L'objet a été déplacé entre 2 à 15m.

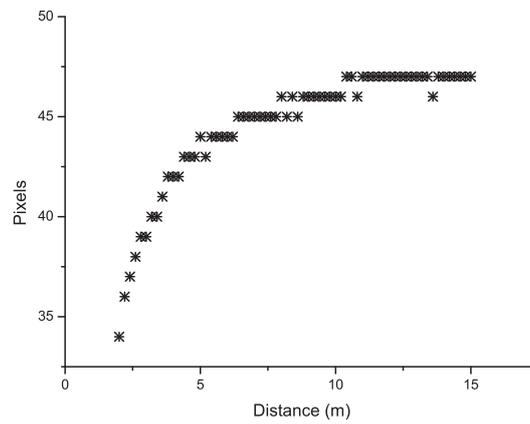


FIGURE 4.12: Données expérimentales de calibration : pixels versus distances

L'erreur peut être réduite si on détermine la position du pixel à l'aide d'algorithmes d'ajustement tenant compte des amplitudes de l'ensemble des pixels. Ces algorithmes seront appliqués seulement pour des distances supérieures à 6m

en ne recherchant pas à avoir une précision supérieure à 50cm. Pour les distances inférieures la résolution est suffisante dans notre contexte d'utilisation.

Cinq algorithmes d'interpolation ont été analysés par Naidu et Fisher [62] pour améliorer la détermination de la position x du pic dont quatre ont été implantés pour mettre en évidence l'avantage de chaque algorithme : le premier est basé sur l'approximation Gaussienne, le deuxième sur le calcul du centre de masse, le troisième par interpolation linéaire et le quatrième par estimation parabolique. On a testé ces algorithmes sur nos relevés expérimentaux des images des spots laser. Pour notre configuration on a choisi d'utiliser la méthode linéaire qui a donné les meilleurs résultats malgré sa simplicité.

Interpolation linéaire : si $f(p+1) > f(p-1)$, $p_{int} = p - \frac{f(p-1)-f(p+1)}{2(f(p)-f(p-1))}$, sinon $x_{int} = p - \frac{f(p-1)-f(p+1)}{2(f(p)-f(p+1))}$

Où p est la position du pixel central, $p-1$ et $p+1$ sont les pixels adjacents et f est l'amplitude du pixel correspondant.

L'estimation de distance par interpolation linéaire est montrée dans la Table 4.3

Distance $D(m)$	pixel maximal	interpolation
6	44	43,96
7	45	44,75
8	46	45,68
9	46	46,05
10	46	46,27

TABLE 4.3: Résultat de l'interpolation avec la méthode linéaire

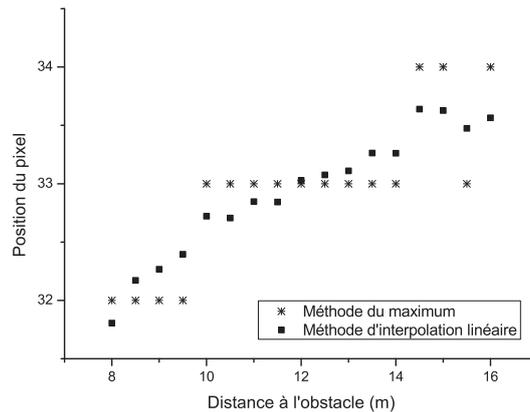


FIGURE 4.13: Interpolation linéaire

Le maximum de précision auquel on peut prétendre dans cette situation à

partir de 8m est le demi-pixel (Fig. 4.13). L'interpolation a été faite sur les 3 pixels de plus forte amplitude. On a essayé sur 4 ou 5 pixels sans amélioration du résultat. Les origines possibles du manque de stabilité du pic sont : l'instabilité du laser et le bruit aléatoire de la barrette

4.2.8 L'instabilité laser

L'instabilité laser est due à des oscillations de la cavité optique. La compétition pour qu'un mode devienne prédominant dans la cavité entre différents modes d'oscillation se traduit par des variations d'amplitude et des sauts en fréquence. Ces oscillations généralement sont produites lors des premiers instants à l'allumage mais sont aussi déclenchées par des réinjections laser dans la cavité dues à l'effet "miroir" extérieur formant une nouvelle cavité d'oscillation. Dans notre schéma de triangulation, le problème de dispersion observable se fait à partir de six mètres, distance à laquelle la réalimentation optique n'offre pas suffisamment de réinjection pour générer d'instabilité modale. En outre, l'optique de l'objectif génère des réflexions vers la cavité du laser. Cependant celles-ci sont placées à une distance fixe. Ainsi, la réinjection optique n'est pas la source de la dispersion du point de focalisation. Par contre on constate que nos diodes lasers à bas coût ne se stabilisent jamais complètement après l'allumage et que les sauts de mode perdurent, de plus les conditions d'utilisation en extérieur font varier en permanence les contraintes thermiques.

Le bruit du détecteur : Le bruit de la CMOS, mesuré et donné par le fabricant, est de 1mV RMS. Dans le signal VOUT pour les pixels valides, il existe un offset et l'amplitude de l'offset est constante pour toute la barrette (d'environ 1,6V). Elle ne varie pas d'un pixel à l'autre. Ainsi, la barrette n'est pas à l'origine de l'instabilité de la position du pic laser.

4.2.9 Cadence de la mesure

La cadence de la mesure dépend du temps de pose et de la vitesse de lecture de la barrette. Si l'obstacle est une surface coopérative (très rétro-réfléchive), le temps de pose doit être court pour ne pas avoir de saturation du signal. La cadence peut atteindre 300 mesures par seconde. Si c'est une surface non coopérative, la cadence minimale prévue est de 25 mesures par seconde.

4.2.10 La mécanique

La mécanique a été développée en tenant compte du diagramme de la Fig. 4.6 et des paramètres décrits dans la section 4.2.4 Le résultat est le module de triangulation montré à la Fig. 4.14. L'implémentation réelle de cette pièce est montrée à la Fig. 4.15.

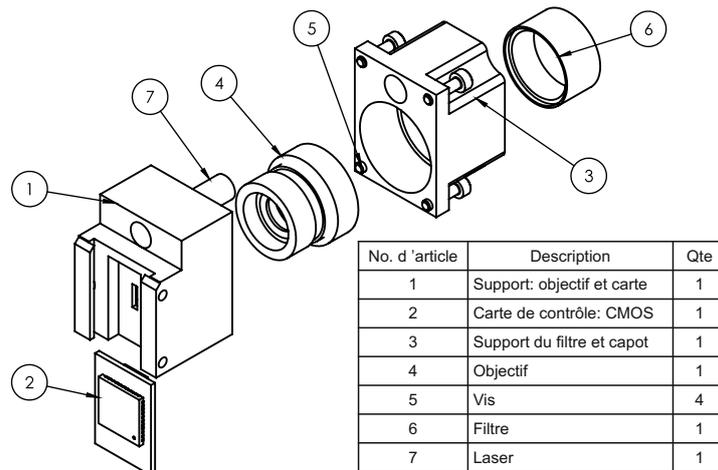


FIGURE 4.14: Vue éclatée de la tête optique



FIGURE 4.15: Image réelle de la tête optique

4.2.11 Tests en conditions extrêmes

Le sol sous forte incidence est un cas difficile à détecter car dans la plupart des situations il est goudronné. La présence de l'eau empire la situation car elle favorise la réflexion spéculaire (incidence oblique). Ainsi, on se sert de ces conditions extrêmes pour obtenir les limites de détection du dispositif.

Une des situations les plus difficiles est le sol mouillé sur fond foncé, Fig 4.16. En effet la quasi-totalité de la lumière est réfléchi, la partie réfractée entrant dans l'eau est faiblement rétro diffusée par le fond (foncé) et une petite partie repart vers l'émetteur. En cas d'une flaque profonde le faisceau sera diffusé dans l'eau et encore plus atténué avant d'atteindre le fond, de même sur le trajet retour.

Les mesures expérimentales sont faites en plaçant la tête optique à une hauteur de 1m. Le laser est pointé sur le sol et on s'éloigne sans "perdre" la cible jusqu'à la limite de détection. Les résultats sont montrés dans la Table. 4.4

D'autres mesures statiques ont été faites : la tête optique détecte un mur blanc

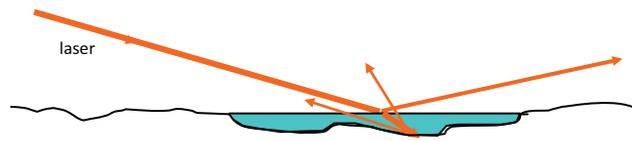


FIGURE 4.16: Flaque d'eau sur fond foncé



FIGURE 4.17: Mesures sur le goudron mouillé

Distance max au sol après la pluie	Distance (m)
Sol goudron mouillé	4,41
Sol goudron foncé mouillé	2,69
Sol goudron foncé eau stagnante 1cm	2,06
Distance max sur sol sec	
Sol goudron	9,06
Sol goudron foncé	6,87

TABLE 4.4: Résultats avec une cadence de mesure de 50Hz

à une distance de 40m et un tronc d'arbre à 20m.

4.3 *Télé tact III*

Le *Télé tact III* est un appareil conçu pour s'utiliser comme aide à la mobilité et est fixé sur la poignée de la canne blanche. Il est constitué de deux modules infrarouges, un module à triangulation laser et un module de communication Bluetooth. Le module infrarouge IR1 détecte les obstacles devant l'utilisateur et le module IR2 détecte les obstacles au niveau de la tête. Le module laser prévient des obstacles fins et des passages étroits lointains. L'alerte est choisie par l'utilisateur entre trois modules externes : vibration, vibration/audio sans fil et audio sur le

portable (smart phone ou PDA). L'alerte présente par défaut sur l'appareil est le module de vibration.

Le rôle de l'accéléromètre est de permettre à l'utilisateur de regarder sur le côté tout en maintenant sa canne devant lui. En effet en effectuant une rotation du poignet à droite ou à gauche détectée par ce capteur, le faisceau laser est déconnecté, ainsi que le module IR1, le module IR2 est orienté sur le côté et permet de détecter efficacement les ouvertures latérales.

Le *Téléact III* est formé principalement de deux unités de contrôle qui gèrent les données de chacun des détecteurs d'obstacles. Le module laser et les détecteurs infrarouges sont les parties essentielles de tout le système (Fig. 4.18). L'unité de contrôle $\mu C3$ reçoit l'information de distance laser, distance du proximètre infrarouge IR1, la valeur de la portée choisie par l'utilisateur et l'inclinaison de l'appareil. Ces informations sont envoyées par $\mu C3$ vers l'unité de contrôle $\mu C4$, ensuite $\mu C4$ envoie toutes les données vers un module extérieur d'alerte.

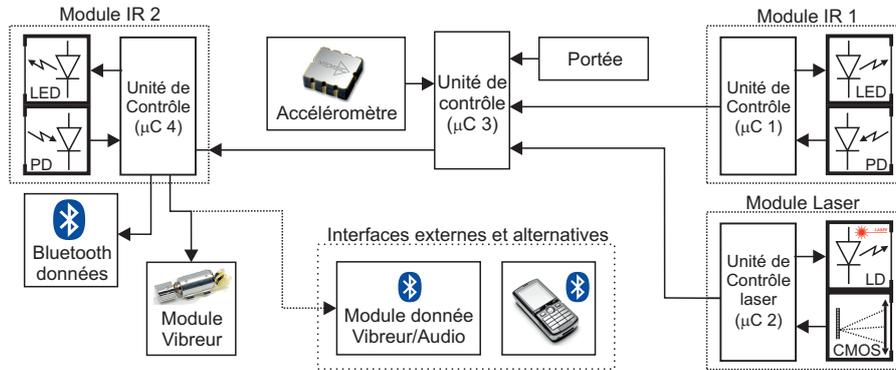


FIGURE 4.18: Schéma du *Téléact III*



FIGURE 4.19: Le *Téléact III*

Tous les modules et interfaces ont été développés dans le laboratoire. L'appareil est montré dans la Fig. 4.19.

4.4 Capacités de détection du télémètre laser

Les calculs photométriques concernant le télémètre laser ont été développés par Farcy *et al.* en 1996 [63, 64] et ne sont pas traités ici. Nous reportons la détectivité du télémètre vérifiée expérimentalement.

Nous allons évaluer les performances en termes de rapport signal sur bruit. Le bruit du capteur est de 1mV RMS. Nous n'évoquerons pas les distances supérieures à 20m qui n'ont pas d'intérêt pratique dans notre contexte. Aux faibles luminosités (moins de 500lux) nous utilisons un rapport signal sur bruit de 6 pour valider la détection, aux très fortes luminosités (plus de 50 000lux) ce rapport est augmenté jusqu'à 20. La justification de ces valeurs est liée aux différents algorithmes de détection qui ont été développés pour le *Téléfact II* et qui ne font pas l'objet de ce travail.

Distance 20m, mur blanc mat (albédo 1), cadence de mesure 100Hz, (S/N) = 1 200.

Distance 20m, mur noir mat (albédo 0,1), cadence de mesure 100Hz, (S/N) = 110.

On étudie en particulier le cas des poteaux ou des potelets noirs anti stationnement car c'est une limitation fondamentale du proximètre infrarouge que doit résoudre le télémètre laser. Ces poteaux lisses, ronds et foncés présentent une partie coopérative lorsque le faisceau laser rencontre la surface du poteau sous une incidence normale. A ce moment le faisceau laser est réfléchi vers le récepteur.



FIGURE 4.20: Surface coopérative (effective) d'un poteau

En photographiant plusieurs poteaux avec flash de nuit, on a estimé que la surface coopérative était une bande blanche d'albédo 1 et de largeur égale à 8% du diamètre du poteau. Cette équivalence est une valeur inférieure à celle du poteau vu sous incidence normale correspondant à une inclinaison de plus ou moins 10 degrés. Par exemple pour un poteau vert foncé brillant de 12 cm de diamètre, on prend comme modèle une bande blanche verticale de 1cm de large, Fig. 4.20.

Dans le cadre de l'utilisation habituelle des dispositifs placés sur la canne (voir détails au chapitre 5), à chaque pas (environ 60cm) le faisceau laser est balayé de droite à gauche d'environ 20 deg. Pour une vitesse de marche rapide (5km/h), on

arrive à une vitesse de balayage de 0,8 rad/s. Pour un petit potelet, on ne dévie pas sa trajectoire 10 ou 20m à l'avance, mais plutôt avec 2 ou 3m d'anticipation, et la déviation doit être juste suffisante pour l'évitement. Nous analysons donc la capacité à détecter cet obstacle à 6m, sachant que tout les 60 cm (à chaque pas) le faisceau laser rencontre le poteau, ce qui laisse la possibilité de trois alertes de présence du poteau et la possibilité d'entamer l'anticipation avec encore 3m d'avance.

A 6m avec une vitesse angulaire de 0,8 rad/s, la vitesse linéaire du faisceau laser est de 4,8m/s, le temps passé sur une bande de largeur 1cm (modèle du poteau de 12 cm de diamètre) est de 2ms.

La durée de lecture des pixels pendant laquelle il n'y a pas pose de l'image est de 1,1ms. Dans le cas défavorable où cet événement arrive quand le faisceau est sur le poteau, le temps utile passé sur le poteau sera de 2ms - 1,1ms soit 0,9ms. Le rapport signal sur bruit est dans cette configuration de 1 100 à 6m. Le potelet noir est donc un obstacle confortablement détecté par le télémètre laser. Dans les mêmes conditions pour le *Téléact II* le rapport signal sur bruit n'était que de 20, la détection en plein soleil présentait parfois des failles à 6m. Le rapport signal sur bruit de plus de 1 000 ne doit pas être considéré comme une marge inutile, certains poteaux peuvent être très inclinés, particulièrement lisses et présenter des conditions plus restrictives que le modèle correspondant aux potelets les plus courants.

4.5 Conclusions

La technique de triangulation laser a été étudiée sous un nouveau compromis. Ce n'est plus le capteur principal qui est le proximètre infrarouge, mais un complément. Nous montrerons au chapitre 5 que cette approche permet de réduire l'effort cognitif demandé à l'utilisateur. Une augmentation de la portée et de la robustesse mécanique ont été obtenues par rapport à la version du *Téléact II* : portée doublée, rapport signal sur bruit triplé, volume du capteur divisé d'un facteur 2. Ceci permet une meilleure fiabilité dans les situations critiques (plein soleil, surfaces foncées spéculaires, etc.)

Chapitre 5

Evaluation des appareils réalisés

5.1 Introduction

Nous avons vu lors du chapitre 2 (2.4 et 2.5.2) les différentes méthodes utilisées pour évaluer l'utilisation des appareils :

- L'interview des utilisateurs qui permet de faire une enquête sur la satisfaction, la fréquence et les conditions d'utilisation.
- Les tests effectués avec des voyants sous bandeau sur un trajet artificiel : l'aller vers un point de référence et le retour, l'aller étant fait sans appareil et le retour avec un appareil. Les différences de comportement entre l'aller et le retour sont relevées.
- Les tests avec des non-voyants faisant un trajet en boucle alternativement avec et sans appareil, ou bien des trajets distincts de difficulté équivalente.

Les méthodes d'évaluation évoquées relèvent soit du domaine des évaluations ergonomiques soit de celui des neurosciences. Le besoin d'évaluer mieux les capacités des détecteurs d'obstacles a été mis en évidence. Nous nous attaquerons ici aux aspects métrologiques qui sont dans la logique des développements des chapitres 3 et 4. On répondra à trois questions : dans un environnement donné, le capteur est-il apte à détecter un passage de taille humaine ? Si oui, l'utilisateur doit-il emprunter ce passage ? S'il emprunte ce passage, quelle est la trajectoire suivie en utilisant l'appareil de manière optimale ? Répondons tout d'abord à la seconde question car elle ne dépend pas directement des propriétés du capteur. En effet, lorsqu'un passage est correctement détecté, cela ne signifie pas qu'il faille le prendre. La personne décide en fonction d'autres informations perçues sur l'environnement si elle doit le prendre ou pas, citons quelques exemples :

- Un non-voyant marche sur un trottoir, il cherche des passages, en priorité, dans la direction correspondant à celle des voitures qui donnent la direction du trottoir. S'il ne trouve pas de passage dans cette direction et qu'il a le choix entre un passage dirigé vers le mur et un autre vers la route, il prendra évidemment celui dirigé vers le mur. Si le seul passage est vers la route, il tâchera de serrer au mieux l'obstacle afin de ne pas marcher sur la route.
- Dans un centre commercial si l'utilisateur entend les pas de la foule allant principalement dans une direction particulière, il l'identifiera comme un passage principal plausible à emprunter dès qu'il perçoit son dégagement avec l'appareil.
- Dans un bâtiment ou une bouche de métro, l'utilisateur identifiera un passage comme une sortie par sa coïncidence avec la direction du courant d'air froid.

La recherche de la direction du passage à prendre appartient au domaine de la locomotion, c'est-à-dire de l'expérience de l'utilisateur, de sa connaissance des codes de la circulation, de son aptitude à faire une synthèse pertinente entre sa connaissance du contexte et les différentes informations auditives et tactiles lui parvenant. Nous avons développé des démarches pour répondre à la première et troisième question en se plaçant dans le cas où le passage détecté est emprunté. Notre objectif est de trouver des méthodes qui ne sont pas forcément dépendantes d'une technologie particulière pour évaluer la pertinence d'un capteur à détecter et guider dans les passages.

5.2 Détection d'un passage

Les configurations d'obstacles réels sont très diverses. Nous avons vu au chapitre 3 que nous avons pu faire des calculs complets dans des cas simples pour la détection des obstacles avec l'appareil infrarouge. Dans les cas réels complexes on arrivait avec une bonne approximation à faire le lien avec les cas simples pour interpréter le passage trouvé expérimentalement.

Nous développons une technique qui ne nécessite pas d'avoir une modélisation du fonctionnement de l'appareil afin qu'elle soit utilisable pour différentes technologies par des gens qui ne sont pas forcément les concepteurs.

Nous allons analyser le cas du passage représentatif des ouvertures de porte, des couloirs encombrés, des rues obstruées etc. Pour rendre la mesure facilement reproductible, nous utilisons une configuration constituée d'une ouverture de largeur d située entre deux panneaux blancs. Les appareils *Tom Pouce I*, *Tom Pouce II*, *Minitact*, *K sonar*, *Miniguide* et *Palmsonar* sont testés pour chaque portée disponible.

5.2.1 Méthode

On cherche la largeur minimale d d'ouverture que l'appareil peut détecter avec une portée donnée sans balayage angulaire de l'appareil. On trace sur le sol une ligne passant par le centre de l'ouverture et perpendiculaire à cette dernière, Fig. 5.1. On part d'une distance supérieure à la portée et on avance sur la ligne tracée au sol en pointant l'appareil vers le centre de l'ouverture. S'il est possible de franchir l'ouverture sans être alerté par la vibration ou le signal sonore, la distance d est diminuée et le processus est répété. La distance d minimale permettant le passage est notée. On reprend le processus avec chaque portée.

Dans la Fig. 5.1, la zone en pointillé correspond à la zone de protection du capteur et R à sa portée (notions définies au chapitre 3).

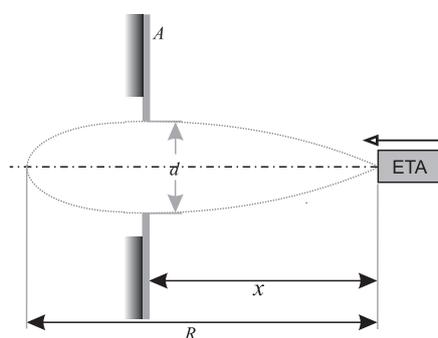


FIGURE 5.1: Schéma expérimental de la détection d'ouverture en vue de dessus

5.2.2 Résultats

Sur la Fig. 5.2, l'axe des abscisses correspond à la portée, chaque point correspond à une mesure avec une portée, en ordonnée on a la largeur minimale du passage détectable. Les points pour chaque appareil sont reliés entre eux afin de pouvoir comparer des appareils n'ayant pas forcément les mêmes portées. Le *Tom Pouce I*, le *Tom Pouce II* et le *Minitact* sont basés sur le même principe technologique et ils sont présentés dans la Fig. 5.2. Les différences sont dues à des compromis différents sur le capteur exposés au chapitre 3. La Fig. 5.3 présente la courbe du *Minitact* et celles des appareils à ultrasons.

On peut constater qu'une porte de largeur standard de 83 cm peut être détectée à une distance de 6 mètres au *Minitact*, de 5 mètres au *Tom Pouce II*, de 4 mètres au *Tom Pouce I*, de 1,8 mètre au *Palmsonar* et de 80 cm au *Miniguide*. Pour le *K sonar*, aucune des deux portées (2m et 5m) ne permet de franchir la porte sans signal retour. Ce test montre des capacités très différentes entre les infrarouges et les ultrasons pour détecter les ouvertures. Seuls les *Palmsonar*, *Tom Pouce I*, *Tom Pouce II* et *Minitact* peuvent anticiper la canne blanche pour trouver une ouverture de porte. Ces aspects ne sont jamais mis en évidence dans

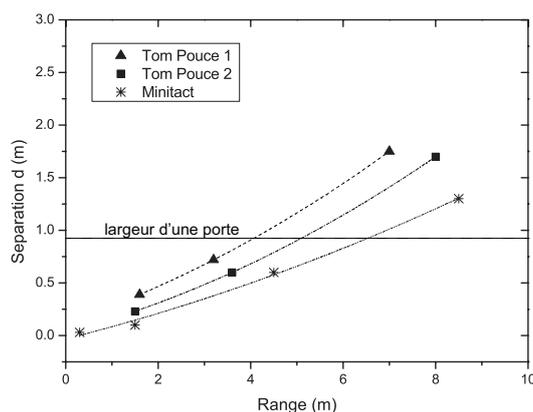


FIGURE 5.2: Comparaison des ouvertures perceptibles en fonction de la portée pour nos dispositifs infrarouges

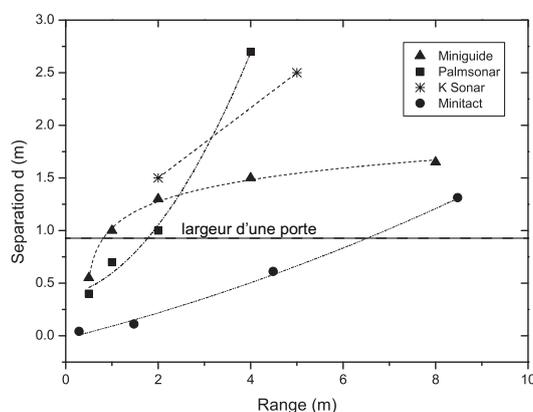


FIGURE 5.3: Comparaison des ouvertures perceptibles en fonction de la portée pour trois dispositifs à ultrasons et le dispositif infrarouge *Minitact*

les documentations d'appareils qui se limitent à préciser la portée sur un mur. Pour un télémètre laser, l'ouverture est détectable à plusieurs dizaines de mètres puisque c'est la "finesse" du faisceau laser qui intervient.

Cette méthode permet de savoir si on perçoit l'ouverture en permanence durant son franchissement. Dès que le trajet devient plus complexe qu'un simple passage, c'est-à-dire passage avec un tournant en chicane, il faut passer à une technique de relevé de la trajectoire en conditions facilement reproductibles, ce qui est l'objet du paragraphe suivant.

5.3 Trajectoires de contournement d'obstacles

On établit dans un premier temps une méthode de détermination de la trajectoire théorique de l'utilisateur induite par l'appareil indépendamment des autres

informations à prendre en considération pour la locomotion. Puis on la mettra à l'épreuve sur quelques obstacles représentatifs : un panneau, un poteau et un mur très large. Ceci mettra en évidence les points forts et les faiblesses des appareils réalisés.

5.3.1 Technique de contournement

Dans le but de mettre en évidence la protection latérale par rapport à l'obstacle, deux trajectoires ont été considérées. La première, dite sans marge de sécurité, consiste à percevoir lors du balayage la direction de la limite de vibration - non vibration et de suivre cette direction limite (Fig. 5.4). La deuxième consiste à laisser cette limite sur la gauche (ou la droite suivant le cas) de son balayage dans le sens de l'éloignement de l'obstacle. Concrètement l'utilisateur prendra une direction faisant un angle de 10 deg avec la direction limite de vibration (Fig. 5.5). Cet angle correspond au demi-angle de balayage de ± 10 deg permettant à la canne de protéger les pieds des trous ou bosses au sol.

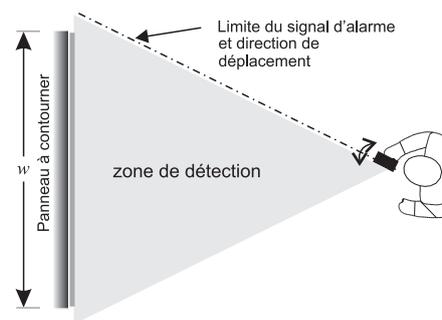


FIGURE 5.4: Schéma expérimental de contournement en vue de dessus

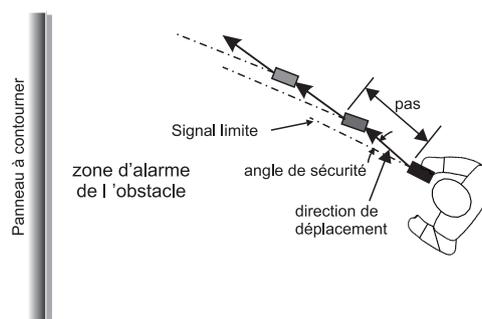


FIGURE 5.5: Procédure de contournement avec un angle de sécurité de 10 deg correspondant à l'amplitude du balayage

Pour la première trajectoire, on balaye l'appareil jusqu'à localiser la direction limite de vibration (présence de l'obstacle). Cette limite définit la direction

à suivre par le non-voyant. Le sol est quadrillé et le déplacement filmé pour mémoriser la trajectoire suivie. L'ajustement de la trajectoire est fait à chaque pas. Le pas est fixé à 0,6m.

La deuxième trajectoire est générée en prenant un angle de sécurité de 10 deg, le balayage est synchronisé avec le pas. De cette façon, l'obstacle est détecté chaque deux pas soit tous les 1,2 mètres. La distance de 0,6m correspond à un pas moyen, selon la taille de la personne celui-ci peut varier de $\pm 10\text{cm}$ mais on a observé que cela n'avait que peu d'influence sur les trajectoires.

5.3.2 Résultats et discussion

Portée sur le mur de face

Les trois appareils utilisés *Tom Pouce I*, *Tom Pouce II* et *Minitact* ont été utilisés avec des valeurs de portée différentes de celles des appareils actuellement en fabrication. Les standards du *Tom Pouce II* et du *Minitact* ont été établis d'après ces mesures, le *Tom Pouce I* très antérieur avait été décalibré volontairement pour analyser ce qui pouvait se passer avec une portée très supérieure à ses trois mètres originaux. Le mur utilisé pour l'expérience était un mur non peint de ciment de 20 m de longueur et trois mètres de hauteur. L'appareil était placé devant le mur (Fig. 5.6). Dans la Fig. 5.6, R est la portée de l'appareil, z la distance de l'appareil au mur. L'ovale est une représentation schématique de l'aire explorée par l'ETA.

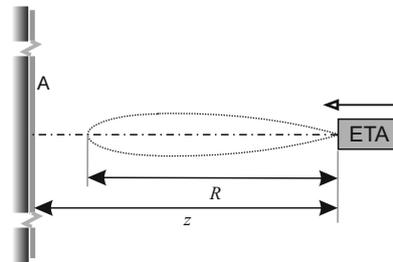


FIGURE 5.6: Schéma du dispositif de mesure de la portée en vue de dessus

D'abord, on marche vers le mur à angle droit, avec l'ETA pointé dans l'axe de déplacement. L'utilisateur s'arrête au commencement de la vibration au moment où $z = R$, avec R portée de l'appareil. Les résultats sont donnés dans la Table 5.1

Evitement d'un mur large

Conformément à la méthode énoncée dans le 5.3.1, les deux trajectoires sont esquissées (Fig. 5.7) : celle sans marge de sécurité (0 deg) et celle avec la marge de sécurité (10 deg). La donnée la plus importante est la distance de protection

Portée	Tom Pouce I	Tom Pouce II	Minitact
0	NA	NA	0,25
1	1,6	1,5	1,6
2	3,2	3,6	3,6
3	7	8	5

TABLE 5.1: Portée mesurée pour chaque appareil

D_p . Elle doit être au moins de la demi-largeur des épaules pour éviter le contact avec le mur, soit 0,25 m pour une personne de corpulence moyenne.

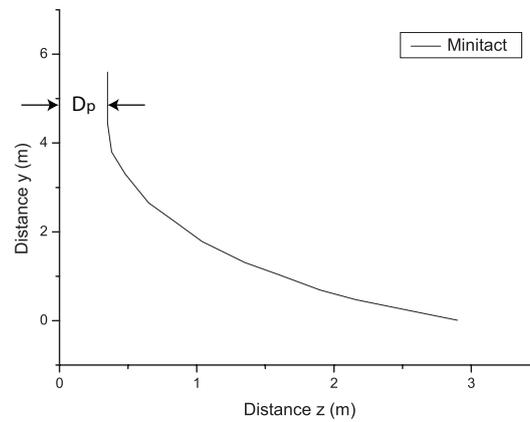


FIGURE 5.7: Trajectoire de contournement d'un mur très large avec l'angle de sécurité

Appareil	Minitact				Tom Pouce I			Tom Pouce II		
	0,25	1,6	3,5	5	1,6	3,2	7	1,5	3,6	8
Portée	0,25	1,6	3,5	5	1,6	3,2	7	1,5	3,6	8
$D_p(0^\circ)$	0	0,07	0,11	0,15	0,14	0,33	0,64	0,07	0,16	0,43
$D_p(10^\circ)$	0,1	0,4	0,45	0,5	0,4	0,6	1,4	0,35	0,5	1,15

TABLE 5.2: Distance de protection au mur large

On remarque dès à présent (Table 5.2) que la distance de sécurité D_p est fortement dépendante de la portée et de la présence ou non de la marge de 10 deg de sécurité (correspondant à l'amplitude du balayage). Sans la marge de sécurité, le mur ne pourrait pas être contourné pour les portées de moins de 4m parce que D_p est inférieur à 0,25m. Avec la marge de sécurité le mur est évité dans toutes les circonstances (sauf pour la portée de 25 cm pour le *Minitact*, mais cette portée n'est jamais utilisée en déplacement, elle l'est pour les files d'attentes). La marge de sécurité peut amener à se placer trop loin du mur dans le cas d'un trottoir étroit. Dans ce cas il faut accepter de sentir la vibration sur les extrémités

du balayage mais ne pas réduire le balayage pour autant car sinon les pieds de l'utilisateur ne sont plus correctement protégés par la canne. On apprend au cours de la formation à ajuster de cette façon sa distance au mur en acceptant la vibration sur une partie plus ou moins grande de l'extrémité du balayage. La portée retenue doit toujours être la plus grande possible permettant de trouver un passage pour optimiser l'anticipation frontale.

Lorsque la direction du mur change, l'utilisateur doit modifier sa trajectoire pour maintenir la vibration dans la même plage angulaire. Pour cela il faut un bon contrôle et une bonne perception mentale de sa flexion extension du poignet. Cela est particulièrement travaillé durant la formation. Les débutants ne sont pas toujours très réguliers dans le maintien de la distance au mur. Bien entendu il faut savoir suivre un mur mais dans le quotidien il ne faut pas systématiquement le faire sous peine de modifier inutilement sa trajectoire pour les décrochements des entrées. Cela fait toujours partie de l'apprentissage et de la synthèse multi sensorielle que de savoir quoi faire dans le contexte.

Contournement d'un panneau

Un panneau d'un mètre de largeur et deux mètres de hauteur a été recouvert de papier blanc et a été placé dans un espace libre. La couverture de papier sert à connaître la réflectivité de l'obstacle. Un axe centré et perpendiculaire au panneau a été marqué au sol, Fig. 5.8. La personne marche initialement le long de l'axe en partant d'une distance supérieure à la portée.

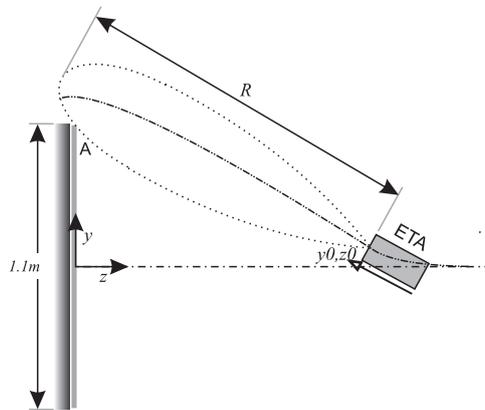
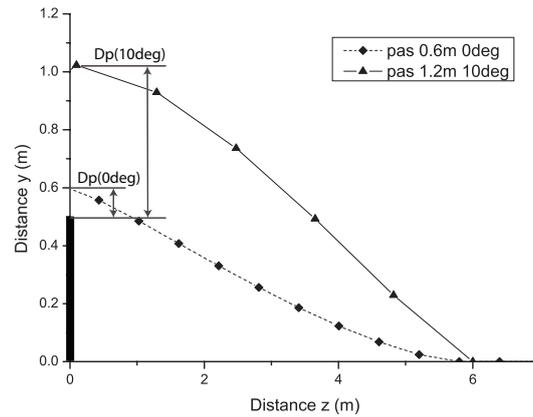


FIGURE 5.8: Contournement d'un panneau

On remarque que dans la Table 5.3, avec la marge de 10deg la distance de protection D_p est suffisante pour les épaules et cela pour toutes les portées utiles au déplacement (0,25m est exclue). Le choix de la portée n'est pas crucial pour le contournement d'un panneau (obstacle). L'avantage de la portée élevée est un contournement qui démarre plus tôt et une déviation réduite. Cela évite de plus de

FIGURE 5.9: Trajectoire de contournement d'un panneau (*Tom Pouce I*)

Appareil	Minitact				Tom Pouce I			Tom Pouce II		
Portée	0,25	1,6	3,5	5	1,6	3,2	7	1,5	3,6	8
$D_p(0^\circ)$	0	0,07	0,09	0,15	0,23	0,35	0,5	0,14	0,19	0,38
$D_p(10^\circ)$	0	0,28	0,35	0,5	0,35	0,45	0,95	0,28	0,43	0,75

TABLE 5.3: Distance de protection (D_p) pour un panneau

rentrer dans les espaces plus étroits ou fermés. Le choix d'une portée plus courte est approprié lorsque l'utilisateur ne trouve pas de passage en ligne droite parce qu'il se trouve dans la foule ou à des endroits ayant une haute densité d'obstacles. Dans ces cas les passages sont en zigzag. Seule une courte portée permet de s'y faufiler en modifiant en permanence sa trajectoire. La règle est simple : toujours utiliser la portée la plus grande permettant de percevoir un passage, ainsi que sa marge angulaire de sécurité. Il y a une seule exception au respect de la marge angulaire, c'est celle de l'ouverture avec obstacle de chaque côté. Pour le *Tom Pouce II* et le *Minitact* en remontant aux mesures du chapitre 3, on voit que la protection des épaules est obtenue pour des portées d'au moins 4m. Dans ce cas on peut rentrer dans une ouverture même si elle apparaît de largeur quasi nulle en ayant les épaules protégées. En effet comme le montre les calculs du chapitre 3, dans le cas d'une ouverture, les deux côtés contribuent à renvoyer de la lumière vers le détecteur et elle renvoie plus de flux qu'un panneau uniquement latéral. Les deux côtés paraissent être plus près de la trajectoire de l'utilisateur que pour un panneau unique. Nous avons fait en sorte que la règle pour l'utilisateur soit simple, à une portée de 4m ou plus, même si la largeur de l'ouverture est minime, on peut la franchir de front sans toucher les épaules. Il n'y a pas besoin de prendre une marge de sécurité comme pour le panneau.

Contournement d'un poteau vertical

Un poteau vertical de quatre centimètres de diamètre et couvert de papier blanc. Le poteau a été placé dans un espace libre, Fig. 5.10. Le processus de contournement est le même que pour les autres obstacles (Fig. 5.9).

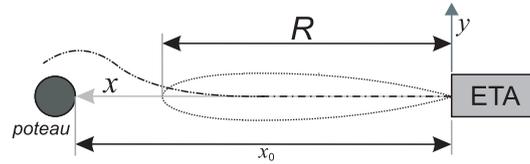


FIGURE 5.10: Schéma de contournement d'un poteau

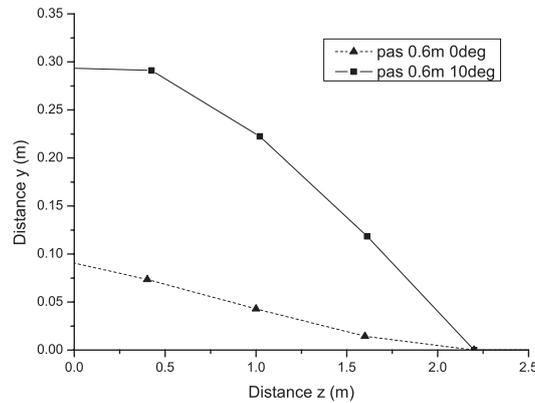


FIGURE 5.11: Contournement d'un poteau (*Tom Pouce I*)

Appareil	Minitact				Tom Pouce I			Tom Pouce II		
	0,25	1,6	3,5	5	1,6	3,2	7	1,5	3,6	8
Portée	0,25	1,6	3,5	5	1,6	3,2	7	1,5	3,6	8
$D_p(0^\circ)$	0	0,05	0,08	0,12	0,08	0,12	0,26	0,07	0,12	0,22
$D_p(10^\circ)$	0,1	0,21	0,32	0,38	0,25	0,36	0,6	0,22	0,33	0,45

TABLE 5.4: Distance de protection pour un poteau

Aucun des appareils ne protège les épaules selon la Table 5.4 sans la marge de sécurité. Afin de ne pas faire de cas litigieux et avoir les épaules toujours protégées avec la marge de sécurité il faut avoir une portée d'au moins deux mètres. C'est pour cela que nous avons choisi pour le *Tom Pouce II* et le *Minitact*, pour la série diffusée, une portée courte à 2m (et non à 1,5m ou 1,6m).

5.4 Conclusion

Cette étude a permis dans un premier temps de vérifier pour nos besoins immédiats que le fait de rendre les faisceaux infrarouges plus étroits (par rapport au *Tom Pouce I* dont le fonctionnement était empiriquement connu) n'introduisait pas de pièges pour l'utilisateur. Pour cela il faut que la portée la plus courte utilisée en déplacement soit de deux mètres. Nous avons choisi quatre mètres pour la portée moyenne car elle assure la protection des épaules dans une ouverture même pour un passage paraissant de largeur quasi nulle avec l'appareil. Si on doit utiliser une portée de 2m pour passer une ouverture étroite on sait que l'on devra se mettre de côté pour la passer. Concernant la portée la plus grande, au-delà de 6 mètres on ne perçoit plus les ouvertures de portes car le faisceau devient trop large. On a donc retenu aussi bien pour le *Tom Pouce II* que pour le *Minitact* les portées de 2m, 4m et 6m (le *Minitact* a une portée supplémentaire de 0,25m et le *Tom Pouce II* a une quatrième portée très courte aussi signalée par une vibration particulière qui permet de gérer par exemples les files d'attentes).

L'étude a également permis de voir que certains obstacles sont perçus plus tardivement avec les dispositifs uniquement infrarouges à cause de leur albédo faible ou de leur étroitesse. Cela n'empêche pas de les éviter correctement à condition qu'ils soient au moins perçus à deux mètres. Si la portée est de six mètres, il n'y a que les poteaux noirs fins brillants qui ne sont pas détectés à plus de 2m. Ce problème est résolu avec le capteur laser (Chap. 4). Par contre le capteur laser ne peut pas seul, à cause de sa finesse, fournir une protection sécurisée latéralement si on ne connaît pas la distance aux obstacles.

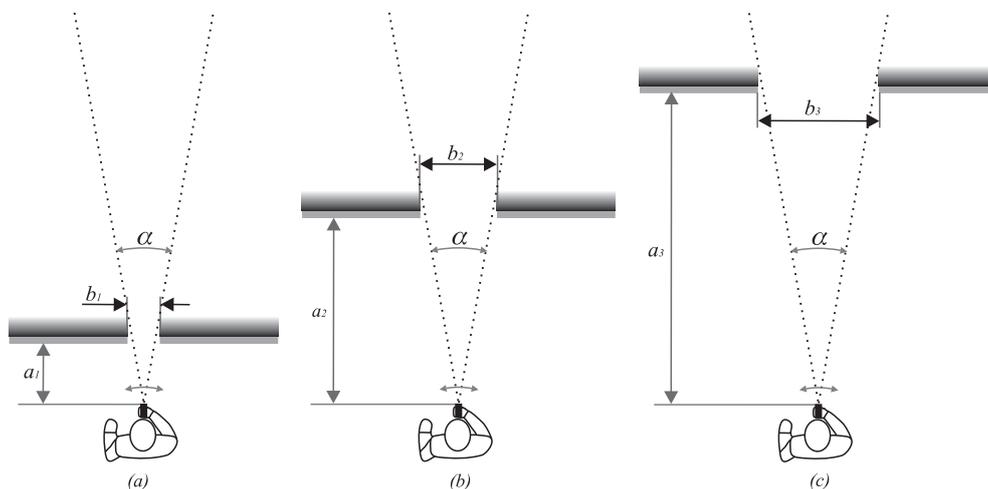


FIGURE 5.12: Schéma de détection d'un passage

Supposons que l'on ait uniquement un télémètre laser, avec un seul seuil de distance supérieur à la distance a_3 (Fig 5.12). Les configurations a , b et c seront

perçues de la même façon, pourtant si on avance dans le cas (a) l'obstacle est heurté, dans le cas (b) on passe juste, dans le cas (c) on a largement de la place pour passer. La seule façon d'évaluer correctement la situation est de percevoir à la fois la distance de manière précise et la largeur angulaire du passage et par une interprétation de cette situation en perspective déterminer si on peut ou ne peut pas passer. C'est le travail fait par les utilisateurs du *Téléact II* où la distance est codée sur 32 notes musicales. En ayant le proximètre infrarouge comme capteur principal (et le télémètre laser pour corriger ses défauts), dans le cas (a) l'utilisateur ne trouve pas de zone libre, dans le cas (b) une zone libre très étroite lui signifiant qu'il passe juste, et dans le cas (c) une zone libre plus large lui signifiant qu'il passe largement. Ainsi le besoin préalable d'analyser une situation complexe de perspective basée sur une perception angulaire fine et une analyse fine du signal musical est remplacée par une règle simple : le signal vibrant est permanent de droite à gauche : il n'y a pas de passage ; il existe un silence de vibration angulairement étroit dans une direction, on a juste de la place pour passer dans cette direction, le silence de vibration est angulairement large, le passage est donc large. C'est le résultat de fond permettant de maintenir la performance dans le déplacement tout en réduisant la charge cognitive de l'utilisateur.

Il reste une faille dans ce schéma : les ouvertures avec obstacles décalés en profondeur donnent systématiquement lieu à des raclements d'épaules. Ce phénomène n'existe pas pour les utilisateurs du *Téléact* sauf erreur d'inattention. En effet si les obstacles sont de part et d'autre mais fortement décalés, Fig. 5.13, chaque obstacle doit être considéré comme un panneau latéral et non une ouverture. Si le passage est étroit et que la distance d'anticipation est de 4m par exemple on va croire que c'est une ouverture standard et que l'on a la place pour passer de front. Mais comme il s'agit en fait de panneaux latéraux et que l'on n'a pas de marge de sécurité, l'épaule va heurter l'obstacle le plus proche. Le problème a été résolu simplement en fournissant deux types de vibration, une continue pour les distances de plus de deux mètres et une granuleuse (intermittente à une fréquence de 20Hz) pour les obstacles à moins de deux mètres. Si la vibration est granuleuse d'un côté et continue de l'autre, on sait que l'on a affaire à des obstacles décalés et on s'éloigne plus de l'obstacle le plus proche. Des pré-tests¹ avec des voyants sous bandeau et des non-voyants ont montré une diminution radicale des frottements d'épaules. La notion de profondeur introduite est également appréciée par les utilisateurs.

On peut pour le moment (faute d'avoir localisé d'autres pièges) annoncer qu'avec deux niveaux de vibration on arrive à gérer l'ensemble des détections de passages en sécurisant les épaules de l'utilisateur.

La concordance des trajectoires théoriques avec celles de non-voyants a été

1. Tests effectués dans une pièce avec des piles de cartons distribuées de façon à reproduire de nombreuses configurations de panneaux décalés

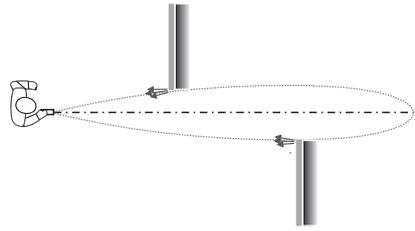
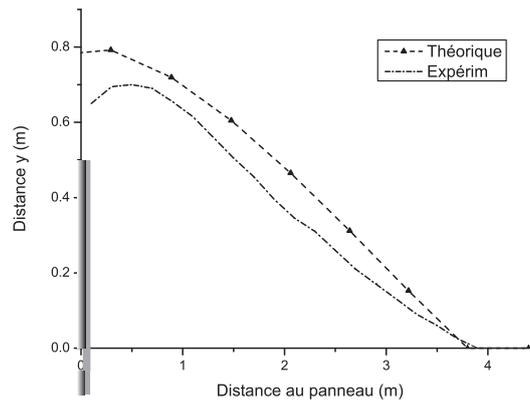


FIGURE 5.13: Ouverture correspondant à deux panneaux latéraux décalés

vérifiée rapidement avec trois utilisateurs dans des conditions où d'autres informations sensorielles de l'environnement ne pouvaient pas intervenir², Fig. 5.14. Les écarts à la trajectoire théorique ont seulement concerné les cas où la personne a hésité pendant un pas à prendre une option à droite ou à gauche de l'obstacle, ce qui a fait un petit zigzag et un retard de prise d'anticipation correspondant à une portée plus courte que celle utilisée. L'objectif futur est de réaliser des études statistiques structurées avec un nombre important de non-voyants.

FIGURE 5.14: Exemple de contournement avec le *Minitact*

2. Dans les sous-sols de l'Institut de Biologie des Plantes, un espace de 25m par 10m par 5m de haut totalement aménageable en configurations d'obstacles sur mesure a été utilisé.

Chapitre 6

Problème de l'identification d'objets spécifiques sur un trajet

6.1 Introduction

La vision périphérique est l'élément essentiel utilisé pour le déplacement. Une vision périphérique monoculaire seule permet aussi de se déplacer sur la base d'images ne fournissant pas directement d'informations de profondeur (utilisation des grandeurs relatives, effets d'ombres, mémoire des contextes, etc.). Dans les outils que nous proposons, toute l'information de textures, formes et contrastes sur une surface plane est absente. Dans ce chapitre on analyse si l'image 2D peut apporter des éléments améliorant le service apporté par nos appareils *Tom pouce* et *Télé tact*.

Ce chapitre est divisé en trois parties :

1. Nous allons dans un premier temps faire un bref état de l'art des dispositifs pour non-voyants annonçant l'utilisation de l'imagerie. Les objets ou obstacles étant à priori les plus intéressants à identifier en complément de la canne électronique sont :
 - le passage piéton : le fait de pouvoir s'assurer que l'on est bien sur un passage piéton avant de traverser est un élément de sécurité qui permet de confirmer son bon positionnement avant de traverser. Il y a également des techniques auditives basées sur le flux de circulation permettant de se positionner. Dans certaines villes, une bande d'arrêt d'urgence se trouve sur le dénivelé précédant le passage. Une confirmation supplémentaire est cependant toujours bienvenue.

- les escaliers : différencier un escalier montant d'un mur est important car un escalier est une suite du passage.
 - les voitures à l'arrêt : ce sont des obstacles pouvant renseigner sur la présence d'un parking, la présence d'une route en l'absence de circulation etc.
 - les personnes : si elles sont vues de face, sont des obstacles susceptibles de se déplacer en fonction de la trajectoire du non-voyant contrairement aux piliers (ou troncs d'arbres) qui peuvent avoir une apparence similaire au travers des capteurs.
 - les panneaux d'indications destinés à orienter les piétons.
2. Dans un second temps on analyse les travaux en traitement d'image des cas précédents, à l'exception des panneaux d'indications. En effet les textes des affiches publicitaires polluent tellement l'espace par leur visibilité et densité bien supérieure aux indications de trajet que nous avons renoncé à analyser ce cas. Nous développons en marge de cette thèse une approche GPS à centrale inertielle s'étendant dans les intérieurs pour traiter tout ce qui se reporte à l'orientation (thèse de Jesus Zegarra).
 3. Dans une troisième partie, on analyse les possibilités d'identification d'objets à distance sans les toucher par des non-voyants avec et sans nos dispositifs. On présente des propositions pour améliorer l'identification d'objets ambigus à la télémétrie sans recourir à l'image 2D.

6.2 Etat de l'art des dispositifs pour non-voyant à base d'images

Les recherches ayant donné lieu à un prototype à base de techniques d'imagerie sont : le système électro-tactile, le *the vOICE* et des systèmes à stéréovision.

6.2.1 Système électro-tactile

Les premiers travaux utilisant une caméra ou une matrice de détecteurs sont ceux de Collin [65] en 1969, et Kurt [19]. L'interface utilisateur est une représentation bi-dimensionnelle produite par des électrodes distribuées sur la peau. En 1985 Bach-y-Rita développa un système qui transforme l'image de l'environnement vers un système matriciel électro-tactile. La dernière version, datant d'environ 2005, est constituée par une petite caméra fixée sur une paire de lunettes, l'interface électro-tactile placée en contact avec la langue, donne l'information bi-dimensionnelle à l'utilisateur, Fig. 6.1.

Le peu de points accessibles (maximum 100 points binaires soit blancs soit noirs), associé à un nécessaire mouvement de la langue pour aller chercher l'information, n'a pas pu fournir d'informations pertinentes au déplacement. Aucune

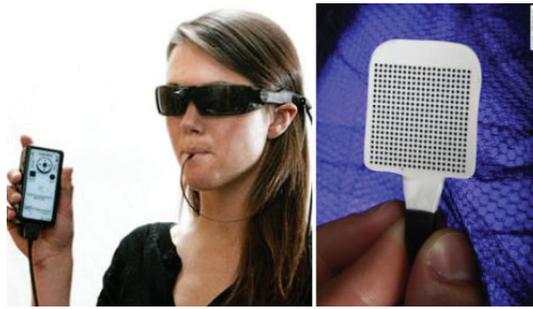


FIGURE 6.1: Système électro-tactile

possibilité d'aide au déplacement grâce à ce type d'appareil n'a été décrite dans la littérature.

6.2.2 *The vOICe*

The vOICe [20] est l'acronyme de *Oh I see*. Il s'agit d'un système qui utilise un algorithme transformant l'information des pixels de l'image en code sonore séquentiel. Le volume représente les niveaux de gris et la fréquence correspond à la position verticale de l'obstacle. Si l'objet est placé en hauteur, le son produit sera plus aigu. Pour chaque image le son commence par les colonnes de gauche et se termine par celles de droite. La caméra se porte sur un casque ou sur des lunettes. Ce dispositif est développé depuis une vingtaine d'années. Il n'a pas donné lieu à des tests d'utilité pour le déplacement.

6.2.3 Système à stéréovision

Le travail effectué par Lisa A. Johnson en 2006 [66] de l'Université d'Arizona montrait un système de détection d'obstacles en utilisant deux caméras à stéréovision attachées à la ceinture (Fig. 6.2). Il prenait des images et les traitait pour obtenir la profondeur des obstacles. L'information envoyée à l'utilisateur était transmise par quatorze vibreurs attachés à la ceinture disposés de façon linéaire autour de la taille. Chaque moteur représentait la position de l'obstacle dans le champ de vision, la vibration étant faible si l'obstacle était loin et forte si c'était le contraire. Le traitement d'image était à 10 trames/s. L'utilisateur portait sur le dos un PC faisant le traitement d'image. Il n'y a pas d'essais fonctionnels connus de ce matériel.

6.2.4 Le CASBlP

Le dispositif [32] a été décrit au paragraphe 2.3.3 du chapitre 2 et il comprend entre autres un système à stéréovision traduisant l'espace en sons.



FIGURE 6.2: Détection d'obstacles selon Lisa Johnson

6.3 Le traitement d'image pour les besoins des déficients visuels

Nous allons analyser dans ce paragraphe diverses techniques utilisées en traitement d'image pour extraire des objets d'intérêt d'une image : passage piéton, automobile, escalier, etc afin d'évaluer l'opportunité de l'intégration d'une caméra dans nos dispositifs. Le paragraphe 6.3.1 correspond à des exemples de traitement réalisés dans le cadre de ce travail de thèse, les paragraphes 6.3.2 à 6.3.4 sont un résumé descriptif d'approches lues dans la bibliographie sans entrer dans les détails.

Une technique couramment employée pour la reconnaissance de formes est la transformation de Hough. On trouve les méthodes de segmentation et de reconnaissance suivantes dans les articles de traitement d'images à destination des non-voyants : “séparation, fusion de régions”, MRF (Markov Random Fields), les méthodes variationnelles, les modèles déformables, etc.

6.3.1 La méthode de la transformation de Hough

La transformation de Hough permet de trouver et d'extraire des formes géométriques dans l'image, comme une ligne [67], un cercle [68], une ellipse [69] et des formes définies par l'utilisateur [70]. La méthode pour extraire les formes géométriques consiste à définir un diagramme à partir de l'image originale (espace image) vers l'espace des paramètres. Par exemple, pour extraire un cercle, après binarisation de l'image, Fig. 6.3(a), on trace des cercles de rayon r centrés sur chaque pixel de l'espace image en traits pleins Fig. 6.3(b) et dans l'espace des paramètres on accumule les intersections entre cercles. Ainsi, le centre du cercle sur l'image se trouve en détectant l'amplitude maximale dans l'espace d'accumulation, l'ensemble des points appartenant au cercle est représenté en pointillé Fig. 6.3(b).

Pour le cas d'une ligne, l'espace d'accumulation est représenté par le module du vecteur position et sa direction (r, θ) . La quantité de points qui appartiennent

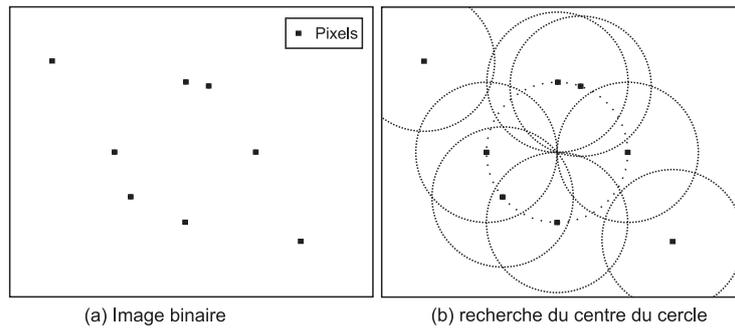


FIGURE 6.3: Transformation de Hough pour un cercle

à une même ligne, sont représentés dans l'espace d'accumulation.

La transformation de Hough est robuste au bruit, à la distorsion et à l'occlusion (manque d'une partie de la forme géométrique). Cependant, le temps de calcul de l'algorithme augmente en fonction du nombre de paramètres n nécessaires pour définir la courbe. Ainsi par exemple on a pour une ligne $n = 2$ (la pente et l'offset), pour le cercle $n = 3$ et pour l'ellipse $n = 5$.

Transformation de Hough pour le passage piéton et le poteau

La représentation paramétrique d'une ligne en r et θ permet d'identifier les lignes du bord de signalisation du passage piéton sur la chaussée.

Soit une image représentée par la Fig. 6.4(a), en lui appliquant la différentielle totale et en la binarisant, on obtient l'image de la Fig. 6.4(b), accentuant les bords. L'image de la Fig. 6.4(c) est l'espace des paramètres résultants de la transformation de Hough qui extrait les positions et les angles des lignes formées pour la génération de l'image binaire. On peut alors extraire les lignes verticales correspondant aux poteaux et horizontales correspondant aux bandes blanches, Fig. 6.4(d).

Avec la transformation de Hough on obtient les coordonnées de toutes les lignes de signalisation du passage piéton.

En traçant une ligne verticale de test sur l'image et en relevant la couleur de chaque pixel sur cette ligne, cela permet de vérifier la distance entre zones blanches. Cela sert à confirmer l'existence du passage piéton.

Transformation de Hough pour les cercles

Une des caractéristiques les plus remarquables et les plus faciles pour la reconnaissance des voitures est le "pneu". En regardant la Fig. 6.5(a), les deux jantes sont séparées par une distance prédéfinie. On peut faire un algorithme de reconnaissance basé sur le rapport entre le diamètre des pneus et la distance de séparation.

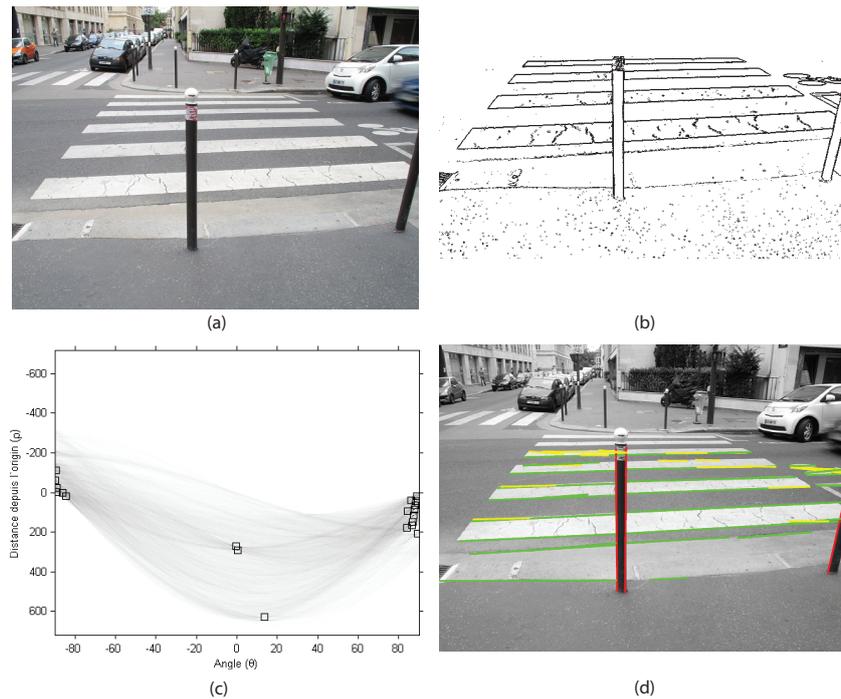


FIGURE 6.4: Processus de la transformation de Hough

Comme dans le cas des lignes, les bords sont d'abord mis en évidence en faisant une binarisation de la différentielle totale, Fig. 6.5(b). La transformation de Hough donne les coordonnées du centre des cercles (deux paramètres). Le troisième paramètre est le rayon du cercle. En cherchant les maxima dans l'espace des paramètres, les coordonnées et les rayons des pneus sont trouvés, Fig. 6.5(c).

A la Fig. 6.5(d), les jantes sont identifiées. Ainsi la voiture peut être reconnue de côté. Cependant dans la plupart des situations de mobilité ou de déplacement, l'utilisateur marche sur le trottoir, et les voitures sont vues par la caméra avec une certaine perspective, Fig. 6.6(a) et 6.6(b). L'identification des pneus devient impossible, car selon la perspective, les jantes deviennent des ellipses ou pire, on ne les voit plus. Si on essaye encore d'être positif et que l'on considère que néanmoins toutes les voitures sont identifiables à partir des ellipses, le nombre de paramètres à traiter en faisant une transformation en ellipse monte à cinq et les calculs deviennent trop longs.

6.3.2 Passage piéton par lignes de fuites

Stephen Se [71] de la British Columbia University en 2002 développa un système expérimental pour identifier le passage piéton et des escaliers. Il utilisait les lignes de fuite d'une image en perspective qui permet de trouver la direction du passage. Il faisait la recherche homographique de deux points de fuite du passage piéton.

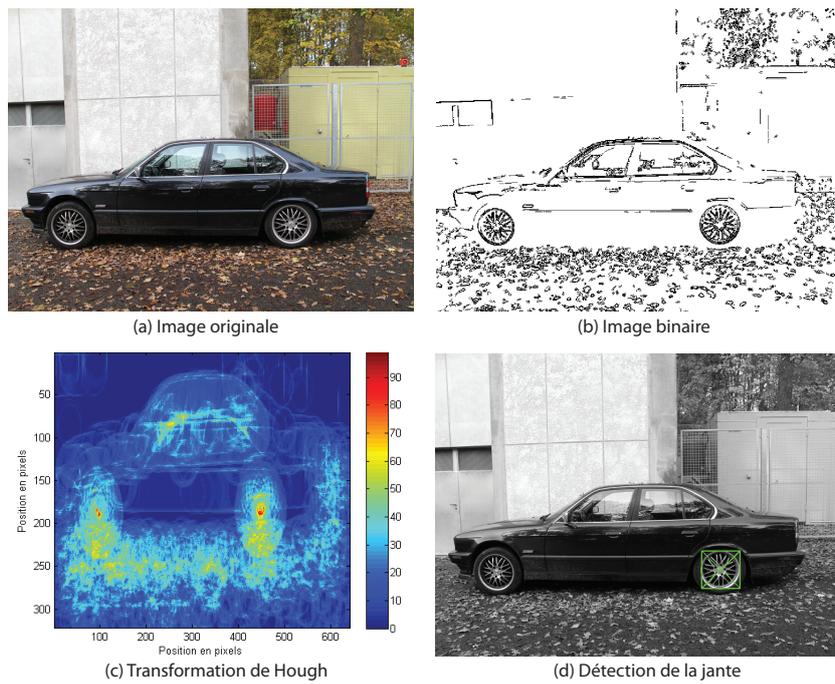


FIGURE 6.5: Transformation de Hough pour le cercle



FIGURE 6.6: Vue d'une voiture

Il énonce que les lignes parallèles des passages piétons forment une image dans la caméra où les lignes convergent vers un point commun, le point de fuite. Il a implémenté un système de deux façons :

1. Il cherchait les points de fuite en utilisant la transformation de Hough : avec une première transformation il soulignait des lignes, ensuite il faisait une nouvelle transformation de Hough pour trouver les points de fuite, c'est à dire l'intersection des lignes.
2. Il sélectionnait les lignes candidates pour les regrouper et ces lignes étaient testées pour vérifier le parallélisme : premièrement, il utilisait la méthode

de détection de bords de Canny¹ et ensuite il faisait une transformation de Hough pour trouver les lignes qui passent par les bords. Il employait une procédure RANSAC² pour discriminer les lignes de fuite. Et finalement il utilisa la méthode des moindres carrés pour trouver le point d'intersection (point de fuite).

Pour vérifier si un groupe de lignes appartient à un passage piéton, celles-ci doivent être en alternance entre noir et blanc. Les résultats sont montrés dans les Fig. 6.7 et 6.8.

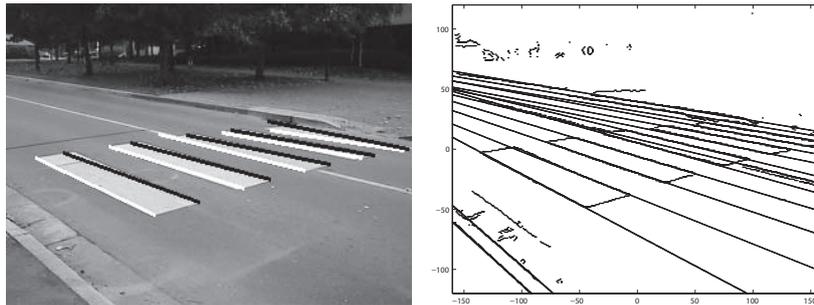


FIGURE 6.7: Détection du passage piéton en utilisant les lignes de fuite

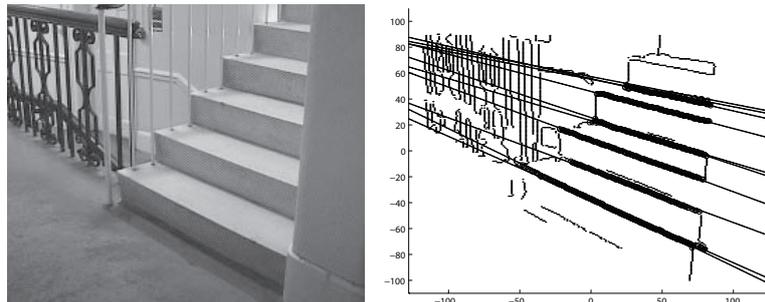


FIGURE 6.8: Détection des escaliers en utilisant les lignes de fuite

Selon l'auteur, le système est trop lent pour être un système en temps réel.

6.3.3 Méthodes de regroupement utilisant la géométrie projective

L'auteur Sven Utcke [72] propose que les lignes caractéristiques des bords vus en perspective (lignes de fuite) d'une image de la rue soient utilisées en conjonction avec un modèle d'incertitude pour améliorer la performance des algorithmes de reconnaissance d'objets.

1. La méthode de Canny a été créée par John Canny en 1983, dans le cadre de son travail de Master au *Massachusetts Institute of Technology (MIT)*.

2. RANSAC : de l'anglais *RANdom SAmple Consensus*, algorithme créé par M. Fischler et R. Bolles et utilisé en imagerie pour l'ajustement d'un modèle.

Il compensait le traitement par une binarisation des bords. Les lignes de passage pour piétons sont sélectionnées si elles ont un coefficient directeur voisin de 30 deg. Les lignes doivent aussi appartenir aux transitions clair, foncé et vice versa. Ces lignes sont évaluées avec un test de “confiance”, ensuite, l’auteur calculait le birapport³ qui élimine les lignes qui ne correspondent pas à une valeur prédéfinie. Une fois confirmées les lignes qui appartiennent au passage, les points de fuite sont déterminés. Si les lignes sont coïncidentes, un birapport plus exact est calculé. Ensuite les lignes de fuites sont redéfinies. Si les lignes correspondent à un passage piéton alors les lignes de fuite coïncident avec l’horizon relatif, Fig. 6.9.

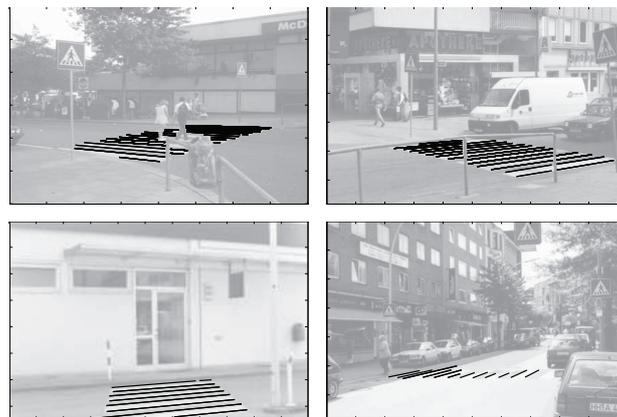


FIGURE 6.9: Détection en utilisant les techniques de la géométrie projective

La méthode de la projection invariante

En 2002, Tadayoshi Shioyama [73] du Kyoto Institute of Technology, utilisait une caméra numérique pour identifier et mesurer la longueur du passage piéton avec une précision de 5% et il avait réussi à avoir une bonne détection du passage piéton en conditions idéales. Il a travaillé aussi sur la reconnaissance des feux de circulation routière. Le temps de traitement de 7,63s était trop pénalisant pour une application réelle. En 2005 une version améliorée de détection du passage piéton était présentée par Uddin et Shioyama [74] où le passage pour piétons était considéré comme une surface bipolaire (blanche ou noire). Voici un résumé de leur travail divisé en trois parties :

1. La segmentation est faite à base de la méthode de polarité et les lignes candidates sont prises selon la surface entre deux lignes.

3. Le birapport ou rapport anharmonique est un outil de la géométrie projective qui est conservé dans une projection centrale

2. Les points caractéristiques sont choisis en utilisant le critère de Fisher⁴.
3. La reconnaissance du passage est faite selon “la projection invariante”.

Finalement, pour l'inférence du passage, ils utilisent le rapport anharmonique entre les largeurs des parties blanches et noires.

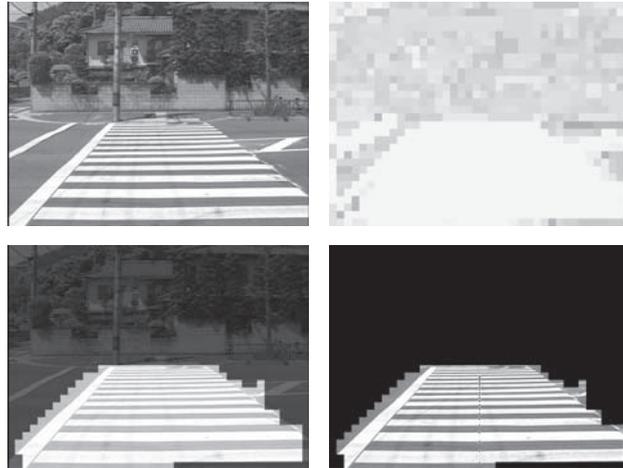


FIGURE 6.10: Système de détection bipolaire

La Fig. 6.10 montre la procédure de détection du passage piéton.

La segmentation “figure-arrière plan”

C'est une méthode de segmentation d'image basée sur une organisation imitant la perception, Fig. 6.11. On assigne un contour à une des deux régions adjacentes [75] fonction de l'information pertinente.

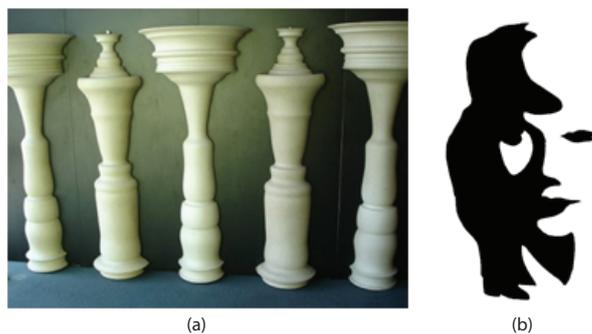


FIGURE 6.11: Perception *figure-arrière plan*

4. Le critère de Fisher est une notion de statistique introduite par R.A. Fisher qui quantifie l'information relative à un paramètre contenue dans une distribution. Il est aussi connu comme le discriminant (linéaire) de Fisher

Dans la Fig. 6.11(a) et (b), il est possible de percevoir deux types de formes selon qu'on la considère comme un fond ou comme une figure.

L'information utile de l'image est obtenue à partir des points caractéristiques. Ils sont rassemblés en nœuds x_i , où chaque nœud peut être défini comme image ou fond selon une distribution de probabilité donnée par :

$$P(x_1, \dots, x_N) = \frac{1}{Z} \prod_{i=1}^N \psi_i(x_i) \prod_{\langle i,j \rangle} \psi_{ij}(x_i, x_j)$$

où Z est le facteur de normalisation, $\psi_i(x_i)$ est la fonction de potentiel qui représente un facteur donnant la probabilité prouvant que la caractéristique x_i appartient au fond ou à l'image, indépendamment des autres caractéristiques proches.

$\psi_{ij}(x_i, x_j)$ est la fonction de potentiel (binaire) qui représente la dépendance entre les deux nœuds.

Les deux fonctions de potentiel sont définies selon les contraintes de l'application. J. Coughlan [75] montre une utilisation de la technique "figure-arrière plan" pour le passage piéton (décrite à la suite).

"figure-arrière plan" pour le passage piéton

Chaque ligne trouvée dans le processus de détection des bords est représentée par y_i , qui dépend de trois variables : la consistance du bord E_i , la distance entre les pixels d_i et les coordonnées des pixels.

La fonction ψ_i exploite la géométrie du passage piéton ; les lignes qui se trouvent plus bas sont plus larges et la largeur verticale de chaque frange est plus petite pour les lignes en position haute. La fonction ψ_{ij} est basée principalement sur le test de rapport anharmonique. Deux lignes de test sont tracées pour extraire deux rapports anharmoniques, r_1 et r_2 .

Les nœuds avec haute valeur de probabilité marginale sont montrés sur la figure ci-dessous.

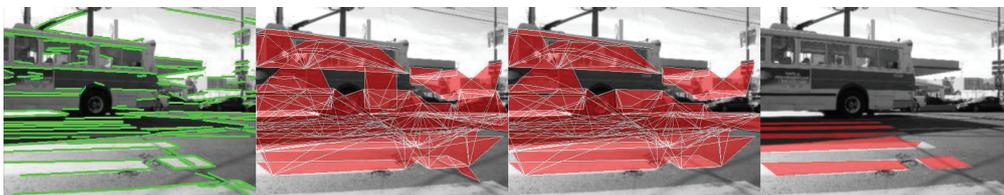


FIGURE 6.12: Évolution du processus "figure-arrière plan"

On peut remarquer, dans la Fig. 6.12, la détection du passage piéton malgré la présence du bus pouvant être confondu avec une bande et la présence de l'ombre qu'il génère sur le passage.

6.3.4 Les modèles déformables

Les modèles déformables n'ont pas été utilisés dans la reconnaissance de passages piétons ou d'escaliers mais ils peuvent être utilisés pour l'identification des voitures. Les modèles déformables se basent sur le choix de points caractéristiques d'un objet à détecter. Les points caractéristiques doivent être définis sur l'image, Fig. 6.13. Puis, les variations de position de ces points sont observées sur un lot d'images d'apprentissage. Le modèle décrit les déformations habituelles des points caractéristiques. En comparant la position des points caractéristiques sur une image de test qui n'appartient pas au lot d'apprentissage, il est possible de vérifier si la variation de la position de ces points est dans les limites du modèle déformable. Si c'est le cas, cela veut dire que l'image est similaire au lot d'apprentissage. Sinon, l'image est considérée comme différente.

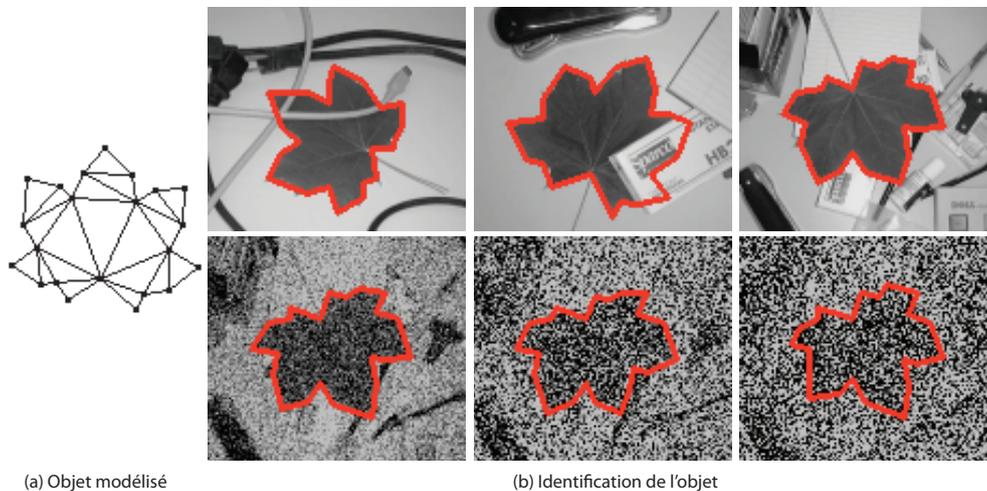


FIGURE 6.13: Reconnaissance d'obstacles avec les modèles déformables

Cette méthode pour la reconnaissance d'une voiture par exemple permettra de faire la reconnaissance sous différentes perspectives.

Modèles déformables pour la reconnaissance d'une voiture

En 2009, Matthew Leotta [76] utilisa les modèles déformables pour identifier 79 modèles de voitures. Il se basa sur un modèle CAO en trois dimensions (de chaque voiture). Il utilisa aussi la méthode "figure-arrière plan" dans une première étape de traitement. Dans la Fig. 6.14 on montre la procédure pour la prédiction de bords en utilisant les modèles déformables : (a) une Nisan Maxima (b) détection des bords (c) bords en accord avec un modèle (d) en vert et rouge respectivement (e) calcul pour obtenir un modèle en 3D (f) et finalement le résultat de la prédiction.

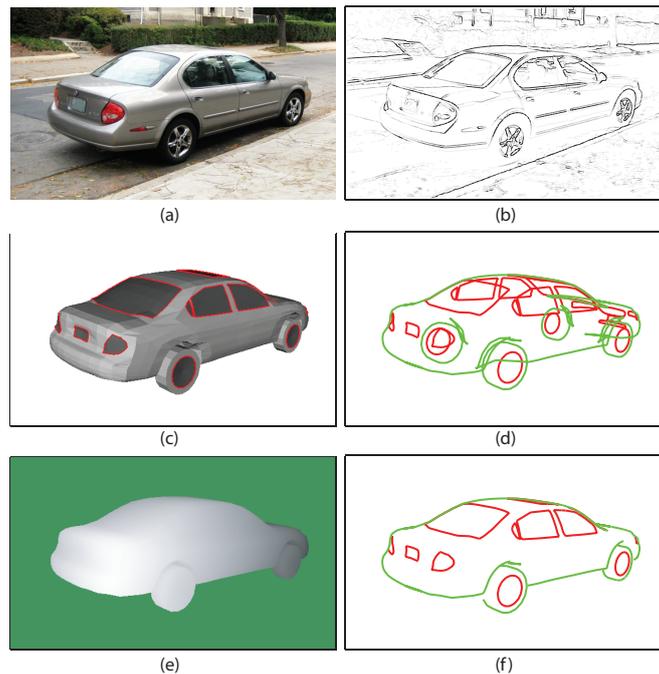


FIGURE 6.14: Étapes pour la reconnaissance d'une voiture

6.3.5 Discussion

Les échantillons de travaux sur le traitement d'image montrent les diverses méthodes utilisées pour identifier seulement le passage piéton. Ils nous permettent de voir la complexité de la reconnaissance d'obstacles pour arriver à un algorithme fiable, robuste et surtout rapide. La méthode apparemment simple de la transformation de Hough permet l'obtention de lignes incluses dans une image très bruitée, mais lorsque les lignes d'une image ne sont pas parfaitement droites et qu'elles se croisent ou qu'elles s'approchent entre elles, la transformation de Hough ne réussit pas à les discriminer. Face à ce problème, il existe d'autres algorithmes comme la segmentation "figure-arrière plan". Cependant ces méthodes statistiques ne permettent pas de gagner en vitesse et en général les méthodes de segmentation sont suivies par d'autres algorithmes. Les systèmes ont un temps de calcul de l'ordre de "plusieurs secondes" mais peu d'articles mentionnent explicitement ce temps.

Pour la voiture, les méthodes actuellement les plus en vue sont basées sur "les modèles déformables". Elles restent complexes et lourdes en calculs.

6.4 Les possibilités perceptives des non-voyants avec et sans canne électronique

6.4.1 Tests en situation

L'équipe a essayé de se faire une idée de ce qui peut être perçu par déduction par les non-voyants avec et sans appareil. Pour cela une étude non publiée testant l'aptitude à reconnaître les objets a été réalisée par Richard Legras, Roger Leroux et René Farcy au laboratoire Aimé Cotton en 2004. Un groupe de 12 non-voyants a emprunté individuellement un trajet urbain inconnu avec une instruction du type trajet par indication : prendre la première route à droite et ensuite la seconde à gauche. En cours de route, on leur a dit de s'arrêter à certains moments lorsqu'ils étaient situés à deux mètres environ d'un obstacle appartenant à la liste suivante : arbre, voiture, panneau publicitaire, poubelle, moto (le non-voyant n'est pas au courant de l'existence d'une liste limitée d'objets). La direction de l'objet a été signalée par une indication de type horaire (midi, 1h, 2h 10h, 11h) et posé la question : quelle est la nature de l'obstacle situé dans cette direction? 4 ou 5 questions ont été posées suivant la fréquence des événements du parcours. Deux parcours différents ont été réalisés, l'un à la canne seule, l'autre avec un appareil *Tom Pouce I* ou *Télé tact II*.

Les résultats sont classés dans le tableau 4.1 par ordre de taux de réussite croissant avec l'appareil. Trois groupes se distinguent : 3 sujets n'ont aucune identification d'obstacle à distance avec ou sans appareil, 5 sujets améliorent un peu leur score avec l'appareil (de 25 à 40%), 4 sujets font une progression importante d'au moins 75%.

Sujet	à la canne seule (%)	avec un appareil (%)	Cécité	
			acquise	congénitale
1	0	0	×	
2	0	0	×	
3	0	0		×
4	0	40		×
5	0	40	×	
6	0	40		×
7	25	50	×	
8	25	50		×
9	0	75	×	
10	20	80		×
11	25	100	×	
12	0	100	×	

TABLE 6.1: Résultats de l'identification d'obstacles

Il ressort de cette étude sommaire que les appareils peuvent être déterminants pour identifier des objets dans le contexte. Ceci serait à confirmer avec une étude portant sur un nombre plus élevé de personnes. Par contre cette faculté n'est pas systématiquement développée par tous les utilisateurs. Une supposition émise est que certains non-voyants se créent des hypothèses sur la nature des obstacles pour les anticiper et d'autres non. Dans les tests de performances réalisés au cours de cette même étude [16], la corrélation entre le taux de reconnaissance d'objets et le score final des utilisateurs est très élevé. Faire de bonnes hypothèses sur la nature de l'objet aide à prendre une bonne option pour trouver le passage optimal. La différence entre les personnes avec cécité congénitale et cécité acquise n'est pas flagrante.

6.4.2 Les astuces du manuel de formation aux aides électroniques

Durant la formation, les instructeurs enseignent les techniques suivantes pour identifier les escaliers et éviter les collisions avec les passants :

Escaliers montants : Aucun des dispositifs (*Tom Pouce* ou *Téléact*) ne détecte les obstacles en dessous du genou, en effet ces obstacles sont potentiellement franchissables (remontée de trottoirs à la fin d'une traversée, changement de niveau d'un sol matérialisé par une ou deux marches etc.). Ils sont détectés uniquement à la canne. Le fait que la canne heurte un obstacle frontal sans que l'appareil aie prévenu signifie qu'il s'agit d'une ou deux marches. Dans le cas de trois ou quatre marches, l'appareil prévient trop tard, la personne n'a pas le temps de s'arrêter, elle en déduit donc que c'est un petit escalier. Ceci couplé au fait que l'on entend éventuellement le bruit des gens qui montent les marches sont des éléments qui résolvent en pratique un bon nombre de situations.

Le *Téléact II* tenu à la main en effectuant un balayage haut bas permet d'identifier un escalier par le profil en échelons. Un seul utilisateur du *Téléact* manie couramment et efficacement l'appareil de cette façon, pour les autres l'appareil est fixé à la canne et ce type de balayage n'est pas possible en situation de routine. Nous classons donc cela dans les possibilités non fonctionnelles.

Passants : Afin de distinguer un passant de face d'un passant de dos ou d'un obstacle fixe dans le contexte d'une foule, les instructeurs enseignent à l'utilisateur à ne pas réagir dans la première seconde de l'alarme de l'obstacle frontal. Si sa vitesse de rapprochement est importante (perceptible au *Téléact* ou au *Tom Pouce II* voir fin du chapitre 5) on marque un court arrêt. Cet arrêt est un code général entre voyants allant entrer en collision et est étonnement plus remarquée qu'une canne blanche. L'alarme doit immédiatement disparaître si c'est une personne arrivant en face qui n'était pas attentive et qui prend alors conscience de la présence de la canne blanche. Si ce n'est pas le cas, s'arrêter alors brutalement et relever

la canne pour éviter ou amortir la collision. Si la vibration persiste au-delà de la seconde sans marquer une vitesse de rapprochement double (personnes avançant face à face) il s'agit d'un obstacle fixe ou d'une personne arrêtée à contourner. Avec un peu d'entraînement cette technique est rapidement fonctionnelle et permet de gérer les foules sans collisions.

6.4.3 Nouvelles astuces avec les nouveaux dispositifs

Les passages piétons : Le *Tom Pouce II* (et par conséquent également le *Télé tact III* contenant toutes les propriétés du *Tom Pouce II*) permet de vérifier facilement l'existence du passage piéton. En effet un passage piéton est fait de peinture microbille particulièrement coopérative. On a vu au chapitre deux que la zone de détection en longue portée de 6m fait environ 1 mètre de large et est très "cylindrique". Cette portée, sous incidence inclinée, est beaucoup plus longue sur de la peinture blanche microbille (cataphote) que sur du goudron. Ainsi, si on lève le poignet de 4 à 5 cm (la canne restant au sol) avant de traverser et que l'appareil se met à vibrer, c'est que le faisceau pointe sur des bandes blanches. S'il n'y a pas de bandes blanches, il faut lever le poignet de plus de 15 cm pour déclencher la vibration sur le goudron. Le procédé est fiable et fonctionne aussi de nuit tant que le passage piéton n'est pas très dégradé. En pratique le trottoir même rabaissé est une élévation suffisante (l'utilisateur étant sur le trottoir et le bout de la canne sur la bordure côté route) pour que l'appareil se mette à vibrer en portée de 6m. On baisse alors le poignet de quelques cm pour redresser le faisceau infrarouge, la disparition de la vibration confirme qu'il s'agit bien d'un passage piéton. Cette technique est testée et sera intégrée dans le manuel de formation.

Les voitures : La plaque d'immatriculation coopérative augmente la distance de détection au proximètre infrarouge, sans affecter celle du télémètre laser. Ainsi l'existence d'une discordance allant dans ce sens permet d'identifier la voiture au *Télé tact III*. La différence entre camion, voiture et moto se fait sur la différence de largeur de l'obstacle perçue au balayage par le poignet de l'utilisateur.

Ces deux astuces exploitent en fait les défauts du proximètre infrarouge. Il y en a certainement d'autres qui apparaîtront au cours de l'utilisation des nouveaux dispositifs en couplant la connaissance de la distance au laser, l'amplitude du signal retour laser, sa "finesse" pour percevoir les détails associé à un proximètre infrarouge de moindre résolution ayant une réflectivité différente et à un accéléromètre donnant le sens du balayage de la canne. Par exemple la verdure a un signal très caractéristique qui permet de l'identifier facilement : l'albédo des feuillages est faible à 650nm pour le laser et quasiment de 1 pour 850nm. Ainsi un feuillage se présente comme une zone d'albédo faible très variable au laser détectant le détail des feuilles. Pour le proximètre infrarouge il se présente comme une masse

uniforme d'albédo élevé car la largeur du cylindre de détection est plus grande que le détail des feuillages.

6.5 Conclusion

Le traitement d'images pour l'aide au déplacement commença il y plus de 50 ans et aujourd'hui il n'existe pas encore un système basé sur ce principe qui permette d'aider le non-voyant dans ses déplacements. La plupart des méthodes requièrent des processeurs très puissants pour le traitement. La robustesse des méthodes aux différentes situations est peu étudiée. L'utilisation d'une petite caméra embarquée gérée par un microcontrôleur ne permet pas de mettre en œuvre les algorithmes existants dans un laps de temps raisonnable. Cette technique est très sensible au niveau de luminosité ambiante, ainsi le soir il est peu probable que le dispositif continue à fonctionner correctement.

D'autre part, nous avons développé quelques astuces sur la base des capteurs existants et du savoir-faire de l'utilisateur permettant de répondre aux questions initiales sur la détection fonctionnelle des passages piétons, des escaliers, des passants, des voitures, etc.

Nous n'avons pas non plus de véritables idées sur ce que pourrait apporter une identification d'images tel que le fait le cerveau humain pour mieux déambuler dans notre contexte.

C'est l'ensemble des points : lenteur, faible efficacité, manque de robustesse des algorithmes, et manque d'idée directrice forte qui nous font à ce jour abandonner l'idée d'intégrer une caméra et un module de traitement embarqué dans nos dispositifs.

La présence d'un télémètre laser et d'un proximètre infrarouge pourrait aider les algorithmes à identifier les obstacles, mais pour cela il faut totalement revoir la façon d'aborder le traitement. Pour faire ce travail, qui ferait l'objet de plusieurs thèses, il faut trouver des objectifs fonctionnels suffisamment porteurs qui ne puissent être obtenus autrement.

Chapitre 7

Conclusion générale

Ce travail s'intègre dans l'activité "Instrumentation pour le déplacement des non-voyants" du Laboratoire Aimé Cotton. Il est parti de deux appareils le *Tom Pouce* et le *Téléact II* développés par l'équipe il y a quelques années et actuellement utilisés par les non-voyants. L'objectif principal a été de trouver une configuration de capteurs permettant un évitement efficace des obstacles (à l'image du *Téléact II*), tout en demandant des efforts d'analyse réduits à l'utilisateur (à l'image du *Tom Pouce*).

Cet objectif a été atteint par la mise en œuvre de plusieurs sous parties :

- L'amélioration des capteurs infrarouges de détection d'obstacles : un calcul photométrique a été implémenté permettant de prédire et de modéliser la zone protégée par le capteur. Une zone de détection de forme quasi cylindrique a pu être obtenue, protégeant les épaules dès les distances courtes et ne s'évasant pas avec la distance. Nous avons montré que cette forme de la zone de protection permettait d'éviter les principales configurations d'obstacles à partir de règles simples d'utilisation. Deux nouveaux appareils le *Minitact* et le *Tom Pouce II* ont été mis à disposition des non-voyants sur ce principe.
- La technique précédente présentant des limitations incontournables (incapacité à détecter les potelets noirs anti stationnement à temps), il est nécessaire de la compléter par une autre technologie. Pour cela les techniques de triangulation utilisées au préalable dans le *Téléact II* ont été revues et ont permis d'aboutir à une meilleure compacité, solidité mécanique et rapport signal sur bruit. L'ensemble des deux techniques a été fusionnée dans le *Téléact III*. Cet appareil est en finalisation de développement pour une disponibilité dans un futur proche.
- Des méthodes de mesure des performances des capteurs dans leur contexte d'utilisation en environnement contrôlé ont été développées. Elles ont permis

de mettre rapidement en évidence les failles des dispositifs et d'apporter les correctifs.

- La possibilité d'intégrer un capteur d'image 2D a été analysée pour apporter une aide à l'identification des objets non directement accessibles à la télémétrie (passages piéton, escaliers, identification de la verdure, etc.). Cette possibilité ne s'est pas avérée fiable à cause d'un manque de robustesse des approches en traitement d'image et l'impossibilité à ce jour d'envisager le temps réel. Par contre nous avons déterminé certaines astuces couplant les données du capteur infrarouge et du télémètre laser permettant de résoudre une bonne partie des besoins identifiés.

Nous avons finalement un procédé permettant de déambuler dans un espace à trois dimensions y compris dans les configurations en forme de chicane avec une trajectoire optimisée. L'anticipation est d'une dizaine de mètres et il n'est pas nécessaire d'intégrer les effets de perspective, mais seulement de connaître 2 ou 3 règles simples. L'interface est seulement à trois niveaux : silence, vibration continue, vibration intermittente. Ce nouveau procédé de codage du passage libre a été transmis à l'ensemble des thérapeutes et la phase d'évolution du matériel et des techniques d'utilisation a commencé pour les 600 utilisateurs non-voyants actuels.

La suite de ce travail sera la finalisation de l'appareil *Télé tact III*. Nous disposons de la protection cylindrique opérationnelle jusqu'à six mètres de distance et d'une détection laser pouvant atteindre 15m. La combinaison de ce deux zones de protection nous amènera à revoir les compromis sur la zone de protection infrarouge utilisée dans le *Tom Pouce II*. Pour optimiser la nouvelle zone de protection, les outils de détermination de la trajectoire décrits au Chapitre 5 seront mis en œuvre.

Bibliographie

- [1] I. A. for the Prevention of Blindness, *State of the world sight VISION 2020 : The right to sight*. Geneva, Switzerland : World Health Organisation, 2005. [cité à la p. 5]
- [2] A. V. Haiy, “Cécité, malvoyance : les données,” [http ://www.avh.asso.fr/rubriques/association/cecite_malvoyance.php](http://www.avh.asso.fr/rubriques/association/cecite_malvoyance.php). [cité à la p. 6, 7]
- [3] M. de la Santé, [http ://www.sante-sports.gouv.fr/IMG/pdf/er416.pdf](http://www.sante-sports.gouv.fr/IMG/pdf/er416.pdf). [cité à la p. 6, 7]
- [4] R. Farcy and B. Billat, “Aides optroniques à la locomotion,” in *Congrès - Association des Instructeurs de Locomotion pour Déficients Visuels AILDV*, 15 janvier 2006, point de vue du concepteur et de l’instructeur. [cité à la p. 8]
- [5] A. P. H. for the Blind, “Hall of fame : Richard edwin hoover,” [http ://www.aph.org/hall_fame/bios/hoover.html](http://www.aph.org/hall_fame/bios/hoover.html). [cité à la p. 8]
- [6] P. Ronzel, G. Dupeyron, and P. Dublineau, “Naissance de la fédération française des services de suite et de réadaptation pour déficients visuels (ffsr-fv),” *Bulletin : ARIBa*, no. 23, pp. 4–6, septembre 2009. [cité à la p. 8]
- [7] M.-L. Bouygues, “Manuel instructeur,” 2010, association Formation aux Cannes Blanches Electroniques. [cité à la p. 8]
- [8] T. N. R. Council, “[http ://sites.nationalacademies.org/nrc/index.htm](http://sites.nationalacademies.org/nrc/index.htm).” [cité à la p. 11, 14]
- [9] W. G. on Mobility Aids for the Visually Impaired, Blind, and C. on Vision, *Electronic Travel Aids : New Directions for Research*. National Academies Press, 1986. [cité à la p. 11]
- [10] B. A. T. Ltd., “[http ://www.batforblind.co.nz/](http://www.batforblind.co.nz/).” [cité à la p. 12, 15, 21]
- [11] B. World, “[http ://www.bestpluton.fr/](http://www.bestpluton.fr/).” [cité à la p. 12]
- [12] T. Pun, P. Roth, G. Bologna, K. Moustakas, and D. Tzovaras, “Image and video processing for visually handicapped people,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2007, 2007. [cité à la p. 12]

- [13] P. Nye and J. Bliss, "Sensory aids for the blind : A challenging problem with lessons for the future," *Proceedings of the IEEE*, vol. 58, no. 12, pp. 1878–1898, Dec. 1970. [cité à la p. 13, 15]
- [14] B. B. Blasch, W. R. Wiener, and R. L. Welsh, *Fundationes of orientation and mobility*, 2nd ed. New York : AFB Press, 1997. [cité à la p. 13, 14, 15, 16, 17]
- [15] L. W. Farmer, *Mobility Devices*. Hines, Illinois : Veterans Administration Hospital, 1978. [cité à la p. 13, 15, 17]
- [16] D. Bolgiano and J. Meeks, E., "A laser cane for the blind," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 3, no. 6, pp. 268–268, Jun 1967. [cité à la p. 13]
- [17] J. M. Benjamin and J. M.S.E.E., "The laser cane," Bionic Instruments, Inc, Bala Cynwyd, Pennsylvania, Tech. Rep. [cité à la p. 14, 15]
- [18] CityCane, "[http ://www.citycane.com/.](http://www.citycane.com/)" [cité à la p. 15]
- [19] K. Kaczmarek, P. Bach-Y-Rita, W. J. Tompkins, and J. G. Webster, "A tactile vision-substitution system for the blind : Computer-controlled partial image sequencing," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions*, vol. 32, no. 8, pp. 602 – 608, Aut. 1985. [cité à la p. 15, 102]
- [20] P. B. L. Meijer, "An experimental system for auditory image representation," *IEEE Transaction on Biomedical Engeineering*, vol. 39, no. 2, pp. 112–121, Février 1992. [cité à la p. 15, 103]
- [21] R. Farcy and Y. Bellik, "Locomotion assistance for the blind," in *In Proc. of the 1st Cambridge Workshop on Universal Access and Assistive Technology (CWUAAT) (incorporating 4th Cambridge Workshop on Rehabilitation Robotics)*, S. Keates, P. Langdon, P. Clarkson, and P. Robinson, Eds., University of Cambridge. Cambridge, United Kingdom : Springer Publ., March 2002, pp. 277 – 284. [cité à la p. 15]
- [22] I. Ulrich and J. Borenstein, "The guidecane-applying mobile robot technologies to assist the visually impaired," *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 31, no. 2, pp. 131–136, Mar 2001. [cité à la p. 15, 17]
- [23] T. Corporation, "[http ://www.palmsonar.com/.](http://www.palmsonar.com/)" [cité à la p. 15, 22]
- [24] S. L. Grow, "The use of the sonic pathfinder as a secondary mobility aid for travel in business environments : a single-subject design," *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 36, no. 4, October 1999. [cité à la p. 17, 26]
- [25] J. Borenstein and I. Ulrich, "The guidecane-a computerized travel aid for the active guidance of blind pedestrians," in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings, 1997 IEEE International Conference on*, vol. 2, Apr 1997, pp. 1283–1288. [cité à la p. 17]
- [26] S. Shoval, I. Ulrich, and J. Borenstein, "Navbelt and the guide-cane [obstacle-avoidance systems for the blind and visually impaired]," *Robotics & Automation Magazine IEEE*, vol. 10, no. 1, pp. 9–20, Mar 2003. [cité à la p. 17]
- [27] R. Yuan, D. Manduchi, "Dynamic environment exploration using a virtual white cane," in *Proceedings of the IEEE Conference on computer vision and pattern recognition (CVPR05)*, San Diego, CA, June 2005. [cité à la p. 18]

- [28] MedGadget, “Less bumping, more guiding,” http://medgadget.com/archives/2007/09/less_bumping_more_guiding.html, Septembre 2010. [cité à la p. 18]
- [29] P. McKenna, “Palm-size walking stick looks out for obstacles,” <http://www.newscientist.com/blog/technology/2008/03/palm-size-walking-stick-looks-out-for.html>. [cité à la p. 18]
- [30] C. Aytakin, “Yanko design : Sightstick for the blind,” <http://www.yankodesign.com/2009/07/31/sightstick-for-the-blind>. [cité à la p. 18]
- [31] Ben-Gurion, “Students develop device to help blind maneuver,” *ScienceDaily*, Juin 2010, <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/06/100603172252.htm>. [cité à la p. 18]
- [32] C. C. A. S. for Blind People, “<http://casblindif.webs.upv.es/>.” [cité à la p. 18, 103]
- [33] S. MacKay, “Virginia tech students engineer vehicle that enables blind drivers to take the wheel,” *VirginiaTech - invent the future*, <http://www.vt.edu/spotlight/innovation/2009-07-27-drivers/2009-07-27-drivers.html>. [cité à la p. 20]
- [34] B. S. Hoyle, J. F. Fowler, D. A. Waters, and D. J. Withington, “Development of the electronic guide cane for enhanced primary mobility for the vision impaired,” in *Euro-Assist-CVHI2004 Conference and Workshop on Assistive Technologies for Vision and Hearing Impairment*, 2004. [cité à la p. 20]
- [35] AbleData, “Sound foresight ltd,” <http://www.abledata.com/>. [cité à la p. 20]
- [36] W. Penrod, M. D. Corbett, and B. Blasch, “A master trainer class for professionals in teaching the ultracane electronic travel device,” *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 99, no. 11, pp. 711 – 714, November 2005. [cité à la p. 20, 25]
- [37] PRIMPO, “isonic : State of the art electronic white cane,” <http://www.primpo.com/eng/products/isonic.html>. [cité à la p. 20]
- [38] S.-M. O. Sonar, “<http://www.sonar-tiflo.narod.ru/>.” [cité à la p. 20]
- [39] Caretec, “Ray - the new handy mobility aid,” <http://www.caretec.at/Mobility.148.0.html?&L=vvlvjzqdqyvf&cHash=90611440e3&detail=3131>. [cité à la p. 20]
- [40] R. G. . C. KG, “Ultra-body-guard : Assistance in everyday life,” <http://www.rtb-bl.de/RTB/ultra-body-guard-2/?lang=en>. [cité à la p. 22]
- [41] G. Research, “Miniguide,” <http://www.gdp-research.com.au/>. [cité à la p. 22]
- [42] VISTAC, “<http://www.vistac.de/>.” [cité à la p. 23]
- [43] N. C. Darling, G. L. Goodrich, and J. K. Wiley, *A preliminary followup study of electronic travel aid users*. Western Blind Rehabilitation Center and Veterans Administration Hospital, 1977, vol. 10, 82–91. [cité à la p. 26]
- [44] B. Blasch, R. Long, and N. Griffin-Shirley, “Results of a national survey of electronic travel aid use.” *Journal of Visual Impairment & Blindness*, vol. 83, pp. 449–453, 1989. [cité à la p. 26]

- [45] J. Brabyn, “Technology as a support system for orientation and mobility - orientation and mobility for blind people,” *American Rehabilitation*, Sept 1997. [cité à la p. 26]
- [46] R. Farcy, “La formation aux cannes blanches electroniques,” Laboratoire Aim   Cotton, Tech. Rep., illustration Vid  o FF16 (Télétact I). [Online]. Available : http://www.lac.u-psud.fr/teletact/locomotion_ formations.htm [cité à la p. 29]
- [47] —, “Bilans,” Laboratoire Aim   Cotton, Tech. Rep. [Online]. Available : <http://www.lac.u-psud.fr/teletact/bilans.htm> [cité à la p. 31]
- [48] R. Damaschini, R. Legras, R. Leroux, and R. Farcy, “Electronic travel aid for blind people,” in *Assistive technology : from virtuality to reality*, A. for the advancement of assistive thechnology AAATE 2005, Ed. IOS Pres, 2005, pp. 251 – 255. [cité à la p. 35]
- [49] R. Farcy, R. Leroux, A. Jucha, R. Damaschini, C. Gregoire, and A. Zogaghi, “Electronic travel aids and electronic orientation aids for blind people : Technical, rehabilitation and everyday life points of view,” in *Proceedings of the International Conference on Assistive Technologies for Vision and Hearing Impairment*, M. A. Hersh, Ed., October 2006. [cité à la p. 35]
- [50] J. Villanueva, R. Damaschini, R. Leroux, C. Coudeville, A. Jucha, C. Magdelaine, A. Zogaghi, M. Bouygues, and R. Farcy, “Les cannes blanches electroniques à interfaces sonores ou vibro-tactiles : aides à l’autonomie et à la sécurité du piéton aveugle,” *STH Sciences et Technologies pour le Handicap : Technologie tactile et ses applications pour les handicaps*, vol. 2, no. 2, pp. 187–199, 2009. [cité à la p. 40]
- [51] T. Ida, “New measures of sharpness for symmetric powder diffraction peak profiles,” *Journal of Applied Crystallography*, vol. 41, no. 2, pp. 393–401, Apr 2008. [Online]. Available : <http://dx.doi.org/10.1107/S0021889807067659> [cité à la p. 41]
- [52] J. L. Meyzonnette and T. Lépine, *Bases de radiom  trie optique*, 2nd ed. C  padu  s, 2001. [cité à la p. 42]
- [53] W. L. Wolfe, *Introduction to Radiometry*. The International Society for Optical Engineering, SPIE, 1998, vol. TT29. [cité à la p. 42]
- [54] J. M. Palmer and B. G. Grant, *The Art of Radiometry*. SPIE, 2009. [cité à la p. 42]
- [55] M.-C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, “Laser ranging : a critical review of usual techniques for distance measurement,” *Optical Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 10–19, 2001. [Online]. Available : <http://link.aip.org/link/?JOE/40/10/1> [cité à la p. 65, 70]
- [56] S. Donati, *Electro-Optical Instrumentation : Sensing and Measuring with Lasers*, 2004. [cité à la p. 65]
- [57] J. Kaliz, “Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution,” *Institute of Physics Publishing : Metrologia*, vol. 41, pp. 17–32, 2004. [cité à la p. 67]
- [58] M. Imaging, “3d time of flight camera,” <http://www.mesa-imaging.ch/>. [cité à la p. 69]
- [59] J. Carpentier, “Ad1901 improvements in enlarging or like cameras,” *GB Patent*, no. 1139, January 1901. [cité à la p. 70]

- [60] T. Scheimpflug, "Improved method and apparatus for the systematic alteration or distortion of plane pictures and images by means of lenses and mirrors for photography and for other purposes," *GB Patent*, no. 1196, May 1904. [cité à la p. 70]
- [61] I. E. C. IEC, *Safety of laser product - Part1*, 2nd ed., ser. IEC 60825-1. IEC. [cité à la p. 74]
- [62] D. K. Naidu and R. B. Fisher, "A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of a stripe to sub-pixel accuracy," in *British Machine Vision Conference Proceeding*, 1991. [cité à la p. 80]
- [63] R. Farcy, B. Denise, and R. Damaschini, "Triangulating laser profilometer as a navigational aid for the blind : optical aspects," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 7, pp. 1161–1166, 1996. [cité à la p. 85]
- [64] R. Farcy and R. Damaschini, "Triangulating laser profilometer as a three-dimensional space perception system for the blind," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 31, pp. 8227–8232, 1997. [cité à la p. 85]
- [65] P. Bach-Y-Rita, C. C. Collis, F. A. Saunders, B. White, and L. Scadden, "Vision substitution by tactile image projection," *Nature*, vol. 221, no. 5184, pp. 963–964, 1969. [cité à la p. 102]
- [66] L. Johnson and C. Higgins, "A navigation aid for the blind using tactile-visual sensory substitution," *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, vol. 1, pp. 6289 – 6292, 2006. [cité à la p. 103]
- [67] R. O. Duda and P. E. Hart, "Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures," *Commun. ACM*, vol. 15, no. 1, pp. 11–15, 1972. [cité à la p. 104]
- [68] G. Foresti, C. Regazzoni, and G. Vernazza, "Circular arc extraction by direct clustering in a 3d hough parameter space," *Signal Processing*, pp. 203–224, 1995. [cité à la p. 104]
- [69] A. S. Aguado and M. S. Nixon, "A new hough transform mapping for ellipse detection," Dept. of Electronics and Computer Science, Univ. of Southampton, Tech. Rep., 1995. [cité à la p. 104]
- [70] D.-M. Tsai, "An improved generalized hough transform for the recognition of overlapping objects," *Image and Vision Computing*, vol. 15, no. 12, pp. 877–888, 1997. [cité à la p. 104]
- [71] S. Se and M. Brady, "Road feature detection and estimation," *Machine Vision and Applications*, vol. 14, pp. 157–165, 2003. [cité à la p. 106]
- [72] S. Utcke, "Grouping based on projective geometry constraints and uncertainty," *Computer Vision, IEEE International Conference on*, vol. 0, pp. 739–746, 1998. [cité à la p. 108]
- [73] T. Shioyama, H. Wu, N. Nakamura, and S. Kitawaki, "Measurement of the length of pedestrian crossing and detection of traffic light from image data," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 1450 – 1457, 2002. [cité à la p. 109]

- [74] M. S. Uddin and T. Shioyama, “Bipolarity- and projective invariant-based zebra-crossing detection for the visually impaired,” *IEEE Computer Society Conference on*, vol. In *Computer Vision and Pattern Recognition - Workshop*, p. 22, 2005. [cité à la p. 109]
- [75] J. M. Coughlan and H. Shen, “A fast algorithm for finding crosswalks using figure-ground segmentation,” *In Proc. 2nd Workshop on Applications of Computer Vision, in conjunction with ECCV*, p. 2, 2006. [cité à la p. 110, 111]
- [76] M. J. Leotta and J. L. Mundy, “Predicting high resolution image edges with a generic, adaptive, 3-d vehicle model,” in *Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE Computer Society Conference on, 2009, pp. 1311–1318. [cité à la p. 112]

Annexe A

Code Mathematica

A.1 Code pour calculer le champ de protection d'un panneau latéral et passage étroit

A.1.1 Panneau latéral

Le programme ci-dessous (A.1.3) calcule la zone de protection d'un panneau latéral (panneau placé parallèle à l'axe y , Fig. 3.7 ou Fig. 3.5 avec $\theta_p = 0$). Le panneau est placé à une distance z_0 de la source et ensuite déplace vers la direction y par pas de $st = 0.1m$ depuis la position $y : y_{lim} = -0.1m$ jusqu'à la position y où l'éclairement prendre la valeur du seuil fixé à $um = 0.00025W/m^2$. Lorsque le seuil est atteint, la valeur de y est montrée. Le calcul est répété pour plusieurs valeur de z .

A.1.2 Passage étroit

Pour calculer la zone de protection d'un passage étroit, on utilise le même programme, car selon la configuration de la Fig. 3.10, l'axe de symétrie est z , donc on peut calculer la zone de protection d'un seul panneau avec un seuil um de $0.000125W/m^2$ que corresponde à la moitié de la valeur utilisé pour la configuration panneau latéral. La valeur ou position y calculé corresponde à la moitié de la séparation entre le deux panneau, $y = d/2$ Fig. 3.10.

A.1.3 Le code

```
z = Table[i * 0.2, {i, 1, 45}]
F = Table[0, {j, 45}];
seuil = Table[0, {j, 45}];
```

```

ylim = -0.1; ρ = 0.99; θ = 0;
st = 0.1; um = 0.00025;
y0 = 0.01615; A = 0.73611; w = 0.10142; m = 1.38928;
For[i = 1, i < 40, i++,
Catch[
Do[
II = NIntegrate  $\left[ \frac{\rho}{\text{Pi} * (z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta])^4} \right.$ 
 $\left( y0 + A * \frac{2 * \text{Gamma}[m] * \sqrt{2^{1/m} - 1}}{\sqrt{\text{Pi} * w * \text{Gamma}[m - 0.5]}} * \left( 1 + 4 \frac{2^{1/m} - 1}{w^2} * \left( \text{ArcTan} \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta]} \right] \right)^2 \right)^{-m} \right) *$ 
 $\left( \text{Cos} \left[ \text{ArcCos} \left[ \frac{-(z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta]) * \text{Cos}[\theta] + x * \text{Sin}[\theta]}{\sqrt{(z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta])^2 + x^2 + y^2}} \right] \right] \right)^2 * \left( \text{Cos} \left[ \text{ArcTan} \left[ \frac{\text{Norm}\{x, y\}}{z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta]} \right] \right] \right)^5 *$ 
 $\text{Sec}[\theta] * \text{Boole} \left[ -18 * \text{Pi}/180 < \text{ArcTan} \left[ \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z[[i]] + x * \text{Tan}[\theta]} \right] < 18 * \text{Pi}/180 \right], \{x, -0.95, 0.95\},$ 
{y, ylim, ylim + 1}];
jj = j;
If[Re[II] >= um && Re[II] < um + 0.000001, Throw[II]];
If[Re[II] > um, ylim = ylim + st, st = st/2];
If[Re[II] > um, 0, ylim = ylim - st],
{j, 50}
]
]; Print[i, " - ", jj, " z = ", z[[i]], " y = ", ylim, " I = ", II]; F[[i]] = ylim;
seuil[[i]] = II; ylim = -0.1; st = 0.1;
]

```

Table des figures

2.1	Causes mondiales de cécité	6
2.2	Personnes atteintes de déficits visuels	7
2.3	Détecteur d'obstacles : (a) première version (b) G-5	13
2.4	La <i>Laser Cane C-5</i>	14
2.5	La <i>Laser Cane N-2000</i>	14
2.6	Le <i>Sonicguide</i>	16
2.7	Le <i>Mowat sensor</i>	16
2.8	Le <i>Sonic Pathfinder</i>	17
2.9	Le <i>Wheelchair Pathfinder</i>	18
2.10	Les systèmes de l'Université du Michigan	18
2.11	Le système CASBlIP - M2	19
2.12	La première voiture conduite par des aveugles	20
2.13	L' <i>Ultracane</i>	21
2.14	L' <i>iSonic Cane</i>	21
2.15	Le <i>Sonar-1UT</i>	21
2.16	Le <i>K sonar</i>	22
2.17	L' <i>Ultra Body Guard</i>	22
2.18	Le <i>Miniguide</i>	23
2.19	Le <i>Palmsonar</i>	23
2.20	Le <i>Laser Long Canne (Vistac)</i>	25
2.21	Diagramme de la triangulation laser	28
2.22	Le <i>Télectact I</i>	29
2.23	Principe du proximètre à infrarouge	30
2.24	Le <i>Télectact II</i>	31
2.25	Le <i>Tom Pouce I</i>	32
3.1	Zone de protection du <i>Tom Pouce I</i> (portées longue et courte)	38
3.2	Champ de détection idéal des genoux à la tête	38
3.3	Diagramme de détection du proximètre	39

3.4	Perception du proximètre	39
3.5	Position relative de la LED et du plan incliné	42
3.6	Diagramme du plan parallèle à l'axe d'émission infrarouge	44
3.7	Schéma expérimental de mesure avec le panneau	46
3.8	Champ de perception théoriques du panneau latéral	47
3.9	Champs de perception expérimentaux et théorique pour un panneau	47
3.10	Schéma expérimental correspondant à une "porte ouverte"	48
3.11	Champs percep. théor. du passage étroit vs la puissance de l'émetteur	48
3.12	Champs de perception expérimental et théorique du passage étroit	49
3.13	Dimensions de la zone de protection	49
3.14	Dépendance des paramètres de la courbe de protection	50
3.15	Dépend. du champ de percep. en fonction de les paramètres de la LED	50
3.16	Distance de détection en fonction de la couleur de l'obstacle	51
3.17	Détection du panneau par rapport à l'albédo et à sa taille	52
3.18	Détection d'un mur avec incidence arbitraire	53
3.19	Le <i>Tom Pouce II</i>	54
3.20	Le <i>Minitact</i>	55
3.21	Zone de non détection du <i>Tom Pouce</i>	55
3.22	"Capteur bas de canne"	55
3.23	Configuration en bas de canne	56
3.24	Appareil avec la protection de la tête	57
3.25	Appareil pour la protection de la tête	57
3.26	Prototype de la "tête haute"	57
3.27	Configurations des <i>Minitacts</i> avec une chaise roulante	58
3.28	<i>Minitacts</i> fixés près des accoudoirs d'un fauteuil électrique	59
3.29	Signal de détection du <i>Tom Pouce II</i> au balayage	59
3.30	Détection d'un passage	60
3.31	Suivi d'un mur	61
3.32	Détection d'une voiture	61
3.33	Bilan de liaison du <i>Minitact</i>	62
4.1	Système avec balayage vertical	68
4.2	Diagramme de base de la triangulation laser	70
4.3	Construction géométrique de la condition Scheimpflug	71
4.4	Relation théor. entre l'incert. et la position de l'obstacle	73
4.5	Schéma servant à déterminer la taille de l'image	75
4.6	Schéma final de la tête optique	76
4.7	Détail de la CMOS	77
4.8	Diagramme temporel de contrôle de la barrette CMOS	77
4.9	Réponse de la barrette pour différentes valeur de temps d'exposition	78
4.10	Mesure du <i>lag</i> de la CMOS	78
4.11	Signal VOUT de la CMOS.	79

4.12	Données expérimentales de calibration : pixels versus distances	79
4.13	Interpolation linéaire	80
4.14	Vue éclatée de la tête optique	82
4.15	Image réelle de la tête optique	82
4.16	Flaque d'eau sur fond foncé	83
4.17	Mesures sur le goudron mouillé	83
4.18	Schéma du <i>Téléact III</i>	84
4.19	Le <i>Téléact III</i>	84
4.20	Surface coopérative (effective) d'un poteau	85
5.1	Schéma expérimental de la détection d'ouverture en vue de dessus	89
5.2	Détection d'un ouverture par nos dispositifs infrarouges	90
5.3	Détection d'un ouverture par trois dispositifs à ultrasons et le <i>Minitact</i>	90
5.4	Schéma expérimental de contournement en vue de dessus	91
5.5	Procédure de contournement avec un angle de sécurité de 10 deg	91
5.6	Schéma du dispositif de mesure de la portée en vue de dessus	92
5.7	Traject. de contournement d'un mur très large avec l'angle de sécurité	93
5.8	Contournement d'un panneau	94
5.9	Trajectoire de contournement d'un panneau (<i>Tom Pouce I</i>)	95
5.10	Schéma de contournement d'un poteau	96
5.11	Contournement d'un poteau (<i>Tom Pouce I</i>)	96
5.12	Schéma de détection d'un passage	97
5.13	Ouverture correspondant à deux panneaux latéraux décalés	99
5.14	Exemple de contournement avec le <i>Minitact</i>	99
6.1	Système électro-tactile	103
6.2	Détection d'obstacles selon Lisa Johnson	104
6.3	Transformation de Hough pour un cercle	105
6.4	Processus de la transformation de Hough	106
6.5	Transformation de Hough pour le cercle	107
6.6	Vue d'une voiture	107
6.7	Détection du passage piéton en utilisant les lignes de fuite	108
6.8	Détection des escaliers en utilisant les lignes de fuite	108
6.9	Détection en utilisant les techniques de la géométrie projective	109
6.10	Système de détection bipolaire	110
6.11	Perception <i>figure-arrière plan</i>	110
6.12	Évolution du processus "figure-arrière plan"	111
6.13	Reconnaissance d'obstacles avec les modèles déformables	112
6.14	Étapes pour la reconnaissance d'une voiture	113

Liste des tableaux

2.1	Acuité visuelle de loin avec la “correction portée”	5
2.2	Tableau recensant les différents appareils	24
3.1	Des obstacles typiques dans la rue	52
3.2	Détection en fonction de l’angle d’incidence	53
4.1	Données sur la défocalisation en fonction de la distance	75
4.2	Données expérimentales sur la défocalisation	76
4.3	Résultat de l’interpolation avec la méthode linéaire	80
4.4	Résultats avec une cadence de mesure de 50Hz	83
5.1	Portée mesurée pour chaque appareil	93
5.2	Distance de protection au mur large	93
5.3	Distance de protection (D_p) pour un panneau	95
5.4	Distance de protection pour un poteau	96
6.1	Résultats de l’identification d’obstacles	114