

Université
de Toulouse

THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par :

Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Discipline ou spécialité :

Informatique

Présentée et soutenue par :

Slim Kammoun

le : mercredi 3 juillet 2013

Titre :

Assistance à la navigation pour les non-voyants :
vers un positionnement, un SIG et un suivi adaptés

Ecole doctorale :

Mathématiques Informatique Télécommunications (MITT)

Unité de recherche :

Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Directeur(s) de Thèse :

Christophe Jouffrais, chargé de recherche au CNRS, HDR

Rapporteurs :

Sylvie Treuillet, maître de conférences, HDR, Université d'Orléans

Mohamed Jemni, professeur, Université de Tunis

Membre(s) du jury :

Florence Gaunet, chargée de recherche au CNRS, HDR

Jean Pierre Jessel, professeur, Université de Toulouse

Emmanuel Dubois, professeur, Université de Toulouse

Marc-Olivier Killijian, chargé de recherche au CNRS, HDR

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE - PAUL SABATIER

ÉCOLE DOCTORALE

Mathématiques, Informatique, Télécommunications de Toulouse

T H È S E

pour obtenir le titre de

Docteur

de l'Université de Toulouse - Paul Sabatier

Mention : Informatique

Présentée et soutenue par

Slim KAMMOUN

Assistance à la navigation pour les non-voyants :

Vers un positionnement, un SIG et un suivi adaptés

Thèse dirigée par Christophe JOUFFRAIS

préparée à l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

3 Juillet 2013

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Mohamed JEMNI	-	Professeur, Université de Tunis
	Sylvie TREUILLET	-	Maître de conférences, HDR, Polytech Orléans
<i>Directeur :</i>	Christophe JOUFFRAIS	-	Chargé de recherche au CNRS, HDR
<i>Examineur :</i>	Jean Pierre JESSEL	-	Professeur, Université de Toulouse
	Emmanuel DUBOIS	-	Professeur, Université de Toulouse
	Florence GAUNET	-	Chargée de recherche au CNRS, HDR
<i>Invité :</i>	Marc-Olivier KILLIJIAN	-	Chargé de recherche au CNRS, HDR

Slim Kammoun

Assistance à la navigation pour les non-voyants :
VERS UN POSITIONNEMENT, UN SIG ET UN SUIVI ADAPTÉS

Directeur de thèse : Christophe Jouffrais, Chargé de Recherche CNRS, HDR, IRIT

Résumé

Le déplacement est une des plus grandes difficultés éprouvées par les déficients visuels dans leur vie quotidienne. Avec l'essor des TIC, plusieurs aides électroniques à la navigation ont vu le jour. L'objectif de ces systèmes est d'améliorer l'autonomie des déficients visuels dans leurs déplacements. Cependant, les aides au déplacement commercialisées aujourd'hui reposent sur une simple adaptation des dispositifs conçus pour les automobilistes et sont donc inadaptés ou mal adaptés à un piéton, de surcroît déficient visuel. Ces systèmes reposent généralement sur un positionnement peu précis et utilisent des cartographies et des stratégies de guidage mal ou non adaptées.

Dans ce travail de doctorat, nous proposons la conception et le développement d'un système d'aide à la navigation destiné aux piétons déficients visuels. Cette thèse s'articule autour de trois problématiques identifiées comme critiques à savoir le positionnement, les systèmes d'informations géographiques et le suivi d'itinéraire.

Le positionnement développé dans NAVIG repose sur la fusion multi capteurs dans le but d'en améliorer la précision. Cette fusion se base sur un module de vision par ordinateur, un système GPS et des capteurs inertiels. Les résultats obtenus montrent la faisabilité de ces techniques dans un contexte de navigation piétonne. Pour la cartographie, nous proposons une classification de données environnementales permettant d'assurer la perception de l'environnement et le calcul d'itinéraire, notamment pour un utilisateur privé de vision. Un modèle conceptuel adéquat pour le stockage des données est aussi proposé. Le suivi d'itinéraire est une fonction qui permet au système de savoir sur quelle section de l'itinéraire se trouve l'utilisateur à tout instant. C'est un processus important, car il permet d'assurer un guidage de qualité. L'amélioration du guidage passe donc par un suivi adapté à un déplacement piéton. Nous avons proposé quatre stratégies de suivi. L'évaluation des performances de ces différentes stratégies de suivi s'est déroulée dans un simulateur de guidage développé au cours de cette thèse. Il s'agit d'un environnement virtuel multimodal qui permet l'évaluation systématique des différents algorithmes proposés dans un environnement contrôlé et sécurisé. Finalement, un prototype du système NAVIG a été réalisé et a été testé auprès de deux utilisateurs déficients visuels, ce qui a mis en évidence un ensemble de verrous toujours présents.

Pour conclure, bien que ce travail de doctorat doive être complété par un ensemble d'évaluations plus systématiques, il a apporté un ensemble de réponses sur un positionnement et un suivi d'itinéraire adaptés à des systèmes d'assistance à la navigation pour déficients visuels. Il ouvre des questions très actuelles sur la disponibilité et le partage des données géographiques et l'utilisation de la vision embarquée. Il ouvre aussi des perspectives intéressantes sur le guidage et la description de l'espace adapté à des utilisateurs piétons et déficients visuels.

Mots clés : non-voyant, navigation, positionnement, système d'information Géographique, réalité augmentée

Slim Kammoun

Navigation assistance for the visually impaired :
TOWARDS ADAPTED POSITIONING, GIS AND TRACKING

Supervisor : Christophe Jouffrais, Chargé de Recherche CNRS, HDR, IRIT

Abstract

Navigation, especially in unknown areas, is a major problem for the visually impaired (VI). Over the past 50 years, a number of electronic travel aids (ETAs) have been developed with the aim of improving mobility of the VI. Despite many research efforts, these systems are rarely used. Although the explanation is likely to be incomplete, it is possible to identify three important factors : (1) positioning accuracy provided by these devices is not sufficient to guide a VI pedestrian, (2) these systems are based on Geographical Information Systems not adapted to pedestrian mobility, and (3) the guidance methods should be adapted to the task of VI pedestrian wayfinding. All these three components are sources of usability issues.

In this thesis, committed in the collaborative research project called NAVIG, we present the design and implementation of an electronic navigation aid for the blind. In this work, we relied on the analysis of the needs of the visually impaired to propose solutions for improving positioning and guidance.

First, we present a solution based on real-time fusion of A-GPS and embedded artificial vision positioning signals. The benefit of our device is two-fold : 1/ it provides a more accurate positioning, compatible with Blind mobility and guidance ; 2/ it matches the needs of Blind users in terms of space perception. Second, we define a classification of objects that should be included in every geographical information system (GIS) that is used in a navigation aid. This classification was based on multiple brainstorming and interviews with blind people and orientation and mobility (O&M) instructors. We present a database scheme integrating the principal classes proposed in this classification. We also propose a methodology allowing the selection of the most appropriate route, based on user needs, and relying on the proposed classification of geographical data. Finally, regarding pedestrian tracking, we propose 3 new strategies adapted to pedestrian navigation. The evaluation of those strategies was performed into a virtual environment framework. To do so, we designed a multimodal (input and output) Virtual Environment (VE) that simulates different interactions that could be used for space perception and guidance in an ETA. This platform subserves two goals : help designers to systematically test guidance strategies (i.e. for the development of new ETAs) and train blind people to use interactive ETAs, with an emphasis on cognitive mapping enhancement. Using this platform we performed several evaluations with 16 users to define the best tracking strategies.

To conclude, the combined positioning (vision, GPS) was successfully evaluated in two real environments (Toulouse University campus, and a district in the Toulouse center). Results from evaluations of tracking strategies shown that it is very important to adapt such strategies to pedestrian navigation.

Keywords : Visually impaired, navigation, positioning, Geographical information system, augmented reality

Remerciements

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Christophe Jouffrais, chargé de recherche au CNRS, pour avoir dirigé et encadré cette thèse, pour sa confiance, sa rigueur scientifique, ses critiques constructives ainsi que pour ces conseils avisés tout au long de ces années. Je le remercie d'autant plus pour l'ambiance amicale qu'il faisait régner lors des différentes réunions.

Mes remerciements les plus respectueux vont à Mr. Mohamed Jemni et à Mme. Sylvie Treuillet qui ont accepté d'évaluer cette thèse et d'en être rapporteurs. Je tiens aussi à remercier Mme. Florence Gaunet, Mr. Jean Pierre Jessel, Mr. Emmanuel Dubois et Mr. Marc-olivier Killijian pour l'honneur qu'ils me font en participant à ce jury de thèse.

Je remercie particulièrement Bernard Oriola et Marc Macé pour avoir suivi ces travaux, pour leurs conseils judicieux et leurs lectures minutieuses. Leurs remarques pertinentes ainsi que leurs conseils ont contribué à l'amélioration de la qualité des travaux présentés dans ce manuscrit.

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe ELIPSE pour l'ambiance chaleureuse et amicale qu'ils font régner dans le couloir. Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail par leurs conseils, leurs remarques ou en ayant participé aux différents tests ou réunions.

Ce travail n'aurait pas été ainsi sans l'aides de Geoffrey Pousse, et Rémi Marquerie, les deux stagiaires avec qui j'ai collaboré, Merci pour votre aide.

Un grand merci à mes amis, Mohamed, Chokri, Adel, Firas, Zied, ... pour les agréables moments passés à Toulouse, à Pau ou à Paris.

Enfin, ce travail, n'aurait pas eu lieu sans le soutiens de ma famille. Un grand merci à mes parents, mes frères ainsi qu'à ma belle famille.

A Rahma et Ibrahim, qui rendent ma vie si belle...

Table des matières

Introduction	1
Contexte et Motivation	1
Problématiques et Contributions	1
Plan de lecture	3
1 Déficiences visuelles et impact sur la Mobilité et l’Orientation	5
1.1 La déficience visuelle : causes et types	6
1.2 Handicaps liés à la déficience visuelle	7
1.2.1 Accès à l’information textuelle	7
1.2.2 Perception de l’environnement	9
1.3 La cognition spatiale	13
1.3.1 Les représentations spatiales	13
1.3.2 La navigation piétonne	14
1.3.3 « Wayfinding » chez les déficients visuels	15
1.4 Navigation fine : les dispositifs d’aide à la mobilité	17
1.4.1 La locomotion chez les Déficiants visuels	17
1.4.2 Les dispositifs d’aides à la mobilité	19
1.5 Conclusion	22
2 Dispositifs électroniques d’aide à la navigation pour DV : Etat de l’art	23
2.1 Les projets de recherche	24
2.1.1 Le Personal Guidance System	24
2.1.2 Le système MoBIC	27
2.1.3 Le système Drishti	27
2.1.4 Le système SWAN	28
2.1.5 Les systèmes avec un opérateur humain	29
2.1.6 Discussion	31
2.2 Les systèmes commercialisés	33
2.2.1 Le Trekker et Trekker Breeze	34
2.2.2 Le système brailleNote	35
2.2.3 Le Kapten	35
2.2.4 Discussion	36
2.3 Localisation et le positionnement pédestre	39
2.3.1 Le système GPS	39
2.3.2 L’équipement de l’environnement	42
2.3.3 La vision artificielle	43
2.3.4 Les centrales inertielles	45
2.3.5 Discussion	45
2.4 Système d’Information Géographique	47
2.4.1 La base de données	48
2.4.2 Les outils d’extraction d’information	50
2.4.3 Discussion	52
2.5 Des interactions non visuelles, en mobilité	53
2.5.1 L’interaction en entrée	53
2.5.2 L’interaction en sortie	54

2.6	Discussion	56
2.6.1	Conclusion	57
3	Vers un positionnement, un SIG et un suivi adaptés	59
3.1	Méthodologie de conception	60
3.1.1	Utilisateurs et participants	60
3.1.2	La conception participative avec les déficients visuels	61
3.2	Besoins des déficients visuels dans la tâche de navigation	62
3.2.1	Déroulement	62
3.2.2	Les données géographiques	63
3.2.3	Le guidage sur un itinéraire	64
3.3	Architecture du Système NAVIG	65
3.4	Améliorer le positionnement par la fusion de données	66
3.4.1	Le positionnement GPS	68
3.4.2	Positionnement par vision artificielle	71
3.4.3	Fusion entre GPS et Vision artificielle	76
3.4.4	Résultats préliminaires du moteur de fusion	77
3.4.5	Discussion	82
3.5	Un système d'information géographique adapté	83
3.5.1	La base de données	83
3.5.2	Le moteur cartographique	91
3.5.3	Le serveur SIG	95
3.5.4	Discussion	96
3.6	Suivi d'itinéraire et guidage pour les piétons déficients visuels	97
3.6.1	Le guidage dans NAVIG	97
3.6.2	Vers un suivi d'itinéraire adapté à un déplacement piéton	98
3.6.3	Le contrôleur de dialogue	103
3.7	Prototypage et preuve de concept	106
3.7.1	Discussion	108
3.8	Conclusion	109
4	Un environnement virtuel multimodal pour l'aide à la conception des systèmes d'assistance à la navigation	111
4.1	La réalité virtuelle	112
4.2	La réalité virtuelle pour les déficients visuels	112
4.3	SIMU4NAV : Un EV pour l'aide à la conception de systèmes d'assistance à la navigation	113
4.3.1	Introduction aux moteurs 3D	113
4.3.2	Les données géographiques	116
4.3.3	Création de l'environnement	117
4.3.4	La gestion des interactions	118
4.3.5	Modélisation du comportement de l'utilisateur	122
4.3.6	Modélisation de l'erreur de positionnement	122
4.4	Conception des bracelets vibrants	123
4.4.1	Choix de conception possibles	123
4.4.2	Protocole	125
4.4.3	Déroulement	126
4.4.4	Résultats	126
4.5	Évaluation des stratégies de suivi	127

4.5.1	Protocole expérimental	128
4.5.2	Résultats	132
4.5.3	Conclusion sur l'évaluation des stratégies	135
4.6	Discussion générale sur le simulateur	137
4.6.1	L'interaction dans SIMU4NAV	138
4.6.2	Modélisation des comportements	138
4.6.3	Environnement virtuel et sources de données	139
4.7	Conclusion	139
	Conclusion générale et Perspectives	141
	Bibliographie	149

Table des figures

1.1	L'afficheur braille.	8
1.2	A gauche un four pour la production de plans avec du papiers thermo-gonflables. A droite un non-voyant explorant une carte en relief.	8
1.3	Schéma de fonctionnement d'un dispositif de perception. Le capteur acquiert l'information qui est traitée puis restituée à l'utilisateur.	9
1.4	Le principe des approches holistique en essayant de présenter l'ensemble des informations de l'environnement (gauche) par une diminution de la résolution (droite)	9
1.5	Première implémentation du TVSS avec une matrice de stimulation électro-tactile dans le dos. Le sujet s'asseyait dans la chaise et percevait des sensations à la surface de la peau en relation avec la scène visuelle capturée par une caméra fixe.	10
1.6	A gauche, le sujet tient la camera dans la main et a sur sa langue la matrice d'électrodes. A droite, la camera est placé sur le front	11
1.7	Le dispositif 'The vOICe' avec les lunettes équipées de caméras et les écouteurs pour la restitution de l'information.	11
1.8	Le prototype CAVIAR de guidage vers des objets d'intérêt par stimulation tactile.	12
1.9	du fonctionnement du prototype de reconnaissance et de localisation d'objets.	13
1.10	le système Tom pouce.	20
1.11	Le système Teletact.	20
1.12	Le système TVS. a. La ceinture avec vibreur. b. Les deux caméras montées sur la ceinture. c. Une utilisatrice équipée du système.	21
1.13	une utilisatrice avec le dispositif EYECane.	21
2.1	Les différents composants du système PGS [Loomis <i>et al.</i> 1994].	24
2.2	le système PGS en action dans le campus de l'université de Californie.	25
2.3	les 4 configurations testées. La configuration « Virtual » se base sur des sons virtuels provenant du point à atteindre. Les trois autres stratégies utilisent des instructions textuelles. La stratégie « Gauche/droite » rajoute une indication « gauche » ou « droite » selon la trajectoire empruntée, pour la troisième configuration, l'angle est donné à l'utilisateur. La quatrième configuration est similaire à la troisième sauf que la valeur de l'angle provient de l'estimation GPS et non pas d'une boussole.	26
2.4	Evaluation de l'interface HPI dans le dispositif PGS.	26
2.5	système Drishti dans le campus de l'université de Floride.	28
2.6	Le système SWAN [Wilson <i>et al.</i> 2007].	29
2.7	Un utilisateur équipé avec le système Naviton.	30
2.8	L'architecture du système Naviton, avec une partie embarquée par le Déficient visuel et un module de contrôle géré par un opérateur.	30
2.9	Représentation d'un cercle virtuel autour d'un point de réorientation. Quand l'utilisateur atteint le cercle le point suivant est signalé.	33
2.10	A gauche le Trekker. A droite le Trekker Breeze.	34
2.11	Le système brailleNoteGPS	35
2.12	A gauche le Kaptén, à droite le cache pour le Kaptén plus.	36

2.13	Trimble Pathfinder Power, un exemple de récepteur D-GPS.	41
2.14	La représentation d'un SIG : la base de données contient l'ensemble des informations géographiques et le moteur cartographique intègre les requêtes et assure la communication avec les autres modules du système.	47
2.15	Un extrait de la cartographie de Toulouse Métropole	49
2.16	Un exemple extrait de [Golledge <i>et al.</i> 1998] qui illustre l'utilisation des buffers pour extraire les informations environnementales	52
2.17	NavTap : Technique de saisie de texte adaptée aux déficients visuels d'après [Guerreiro <i>et al.</i> 2009]	54
2.18	L'interface tactile du Wayfinder. Une ceinture composée de 6 vibreurs [Heuten <i>et al.</i> 2008].	56
3.1	la représentation du panel participant dans le projet NAVIG	61
3.2	Déroulement des séances de Brainstormings.	62
3.3	Deux photos d'un utilisateur non voyant observé pendant différents trajets.	63
3.4	Architecture globale du système NAVIG.	65
3.5	Le Principe de l'approche de fusion NAVIG. Le module de positionnement du système NAVIG repose sur la fusion des données GPS et de la position estimée par le module de vision artificielle embarqué par l'utilisateur	68
3.6	L'utilisation du boîtier Angéo dans le système NAVIG. Angéo est un boîtier fonctionnant sous Unix et compatible Ivy.	69
3.7	Les performances du moteur de reconnaissance Spiknet, particulièrement robuste à l'orientation, aux variations de contraste ou de luminosité.	72
3.8	Le capteur choisi pour le système de vision artificielle : La Bumblebee.	73
3.9	Reconnaissance des différentes cibles dans l'environnement.	74
3.10	Illustration de l'importance du capteur tête pour déterminer la position par vision artificielle.	74
3.11	L'impact de 40° d'erreur sur la position calculée par le module de vision artificielle.	75
3.12	L'utilisateur embarque le module de positionnement : La bumblebee et la centrale inertielle placée sur la tête ainsi qu'un PC dans le sac à dos.	75
3.13	Histogramme des erreurs de position renvoyées par le module de vision artificielle. L'erreur correspond à la différence des distances réelles (entre l'utilisateur et l'objet) et estimées (renvoyées par le module de vision).	76
3.14	Architecture du module de fusion avec les deux phases.	77
3.15	L'itinéraire #1 défini dans le campus de l'université. Les losanges représentent les points marqués au sol tous les 4,5m. L'expérimentateur, équipé avec le prototype NAVIG, doit suivre ces points pour recueillir plusieurs jeux de données successifs.	79
3.16	Illustration du positionnement GPS seul sur l'itinéraire #1. Alors que le positionnement est relativement correct en terrain dégagé, il dérive fortement en dessous du préau.	80
3.17	Représentations du trajet #1. Trace du GPS en jaune et de la position fusionnée en bleu.	80
3.18	Représentation du trajet #2. Trace issue du GPS seul en jaune et du moteur de fusion en bleu.	81
3.19	Extrait du modèle conceptuel de données représentant la base de données.	88

3.20	Un exemple d'esquisse utilisé lors de la collecte de données sur le campus. Le domaine de l'université étant considéré comme privé, les données géographiques de Google Map, par exemple, ne sont pas utilisables et ne sont pas assez précises.	91
3.21	La fonction de normalisation de la distance	95
3.22	Un couloir virtuel est créé. Une erreur est détectée dès que l'utilisateur sort des limites fixées par le couloir virtuel. Adapté de [Centre d'études sur les réseaux 2012]	99
3.23	Représentation d'un cercle virtuel autour d'un point d'itinéraire. Quand l'utilisateur atteint le cercle le point suivant est signalé.	99
3.24	Illustration de la stratégie des distances par rapport aux droites	100
3.25	Illustration de la validation d'un PI par distance aux segments	101
3.26	Illustration de la validation d'un PI par distance aux segments	101
3.27	Illustration de la stratégie de validation par la distance projetée	102
3.28	Les différentes stratégies de suivi ainsi que les parties du plan à partir desquelles le point d'itinéraire en cours (étoile) est validé.	102
3.29	Tableau de bord du contrôleur de dialogue. Les différentes parties distinctes sont encadrées. Elles seront détaillées dans la suite.	103
3.30	Processus de calcul d'un itinéraire. Le CD se charge de transformer les données de l'utilisateur en requêtes compréhensibles par le moteur cartographique	104
3.31	Illustration de l'algorithme de guidage proposé en utilisant les différents points annotés.	106
3.32	Un utilisateur équipé avec NAVIG.	107
3.33	A gauche, un premier utilisateur utilisant le chien guide au cours de l'utilisation du système NAVIG dans le campus de l'université. A droite, un deuxième utilisateur utilisant la canne en train de réaliser un itinéraire avec le système NAVIG.	107
4.1	Position du moteur 3D par rapport au développeur et à l'utilisateur.	114
4.2	Processus d'extraction d'une zone à partir d'OSM sous forme d'un fichier XML.	116
4.3	Représentation d'un bâtiment dans l'environnement virtuel.	117
4.4	Vue d'ensemble de l'affichage offert par le simulateur.	118
4.5	Représentation de la vue radars.	118
4.6	L'utilisation du périphérique Phantom Omni dans «BlindAid», un environnement virtuel multimodal pour non-voyants [Schloerb <i>et al.</i> 2010].	120
4.7	Prototype de bracelets vibrants connectés en Bluetooth à une carte de contrôle Arduino.	121
4.8	L'éditeur d'interaction. Dans la partie encadrée, à gauche, nous avons les différents événements et à droite une liste déroulante qui contient les feedback prévu. pour chaque événement un feedback peut être alloué.	121
4.9	Représentation d'un exemple de dérive. En avançant, le déplacement se fait avec une dérive aléatoire vers la droite ou la gauche. Les deux cercles verts sont deux points de l'itinéraire. Les flèches représentent la position et l'orientation de l'avatar. Les carrés gris représentent les bâtiments	122

4.10	Une représentation de l'erreur de positionnement. Les cercles verts sont les ponts de l'itinéraire. La trace en gras (succession de ronds) est la position exacte de l'utilisateur. La trace en pointillé est la position incluant l'erreur modélisée. Lors d'un test incluant la simulation d'un GPS, c'est la position bruitée qui sera utilisée.	123
4.11	A gauche, le vibreur utilisé. A droite les deux bracelets vibrants conçus. . .	124
4.12	Les différents patrons utilisés par le Pocket Navigator pour indiquer les directions. Figure extraite de [Pielot <i>et al.</i> 2010]	124
4.13	Les deux patrons vibratoires utilisés dans notre étude.	125
4.14	Métaphore du "mur" : la vibration indique la direction de laquelle s'éloigner.	125
4.15	Métaphore de "l'aimant" : la vibration indique la direction vers laquelle se diriger.	126
4.16	Déroulement de l'étude. L'expérimentateur suit le non-voyant et envoie les instructions lorsque l'utilisateur dévie. Un marquage au sol permet de voir si l'utilisateur dévie	127
4.17	Un utilisateur lors d'une session d'évaluation. L'écran est dirigé vers l'expérimentateur qui suit la progression du sujet le long des différents itinéraires dans l'environnement 3D.	128
4.18	Les quatre itinéraires choisis aléatoirement pour les tests.	129
4.19	Un exemple de guidage avec le simulateur. L'utilisateur doit se diriger vers la boule verte qui représente le prochain point d'itinéraire à atteindre. Image de gauche : le son est perçu à gauche. Image de droite : le son est perçu à droite. Les points bleus sont des points de repères (e.g. changement de revêtement) qui sont sonifiés lorsque l'utilisateur arrive à leur proximité. . .	130
4.20	Un exemple des quatre trajets réalisés chacun avec une stratégie différente par un utilisateur. Les cercles verts représentent les différents points d'itinéraire (aussi appelé points de réorientation). Ces points sont reliés entre eux par les différentes sections formant l'itinéraire. En pointillés, le positionnement global (avec erreur) utilisé par le système pour suivre le déplacement du sujet.	132
4.21	Moyenne (pour les 16 sujets) de la distance parcourue sur l'ensemble du trajet en fonction des 4 stratégies. La distance totale parcourue est significativement plus élevée pour la stratégie S1 que pour les autres stratégies. . .	133
4.22	Moyenne du temps de parcours (en secondes) pour l'ensemble des 16 sujets en fonction des 4 stratégies. Entre les stratégies 1 et 4. Le temps de parcours est significativement plus élevé pour la stratégie S1 que pour les autres stratégies.	134
4.23	Moyenne du temps de parcours autour des points de réorientations (en secondes) pour l'ensemble des 16 sujets en fonction des 4 stratégies. Entre les stratégies S1 et S4, le temps de parcours moyen autour des virages décroît significativement.	134
4.24	Moyenne des distances parcourues par stratégie de suivi selon l'utilisation ou non du retour haptique avec les bracelets.	135
4.25	Temps de parcours par stratégie de suivi selon l'utilisation ou non du retour haptique avec les bracelets.	136
4.26	Moyennes de distance hors itinéraire avec et sans bracelets vibrants.	136
4.27	Moyenne de nombre des arrêts supérieurs à 4 secondes avec et sans bracelets	137

Liste des tableaux

1.1	Différentes caractéristiques entre les représentations carte et route selon [O’Keefe & Nadel 1978]	14
2.1	Les principaux projets de recherche pour la conception de système d’aide à la navigation destinés aux déficients visuels	32
2.2	Récapitulatif des principaux systèmes d’aide à la navigation commercialisés.	38
2.3	Sources d’erreurs du GPS et les erreurs respectives à chaque source	40
2.4	les différentes techniques de positionnement qui peuvent être utilisées dans un système d’aide à la navigation.	45
3.1	La liste des modules du système NAVIG, leurs acronymes dans le reste de ce manuscrit ainsi que leurs rôles	67
3.2	Description des différents champs du message envoyé par Angéo sur le bus Ivy	70
3.3	Précision de positionnement	70
3.4	Précision du Cap	70
3.5	Les différents modes de fonctionnement du module Angéo.	71
3.6	Dictionnaire de données de la table Lieu	85
3.7	Dictionnaire de données de la table TypeArc	86
3.8	Les différents types d’arcs que nous avons recensés et qui sont stockés dans la base de données	86
3.9	Dictionnaire de données de la table Noeud	86
3.10	Les différents types de revêtements recensés et stockés dans la table Arc.	86
3.11	Dictionnaire de données de la table TypeRevetement.	87
3.12	Les différentes largeurs considérées importantes et qui ont été proposées lors de l’analyse.	87
3.13	Dictionnaire de données de la table TypeLargeur	88
3.14	Le dictionnaire de données de la table Arc	89
3.15	Dictionnaire de données de la table TbPoint	90
3.16	Dictionnaire de données de la table TbPolygone	90
3.17	L’ensemble des primitives implémentées dans le moteur cartographique.	93

Introduction

Contexte et Motivation

Dans un monde aussi visuel que le notre, se déplacer dans un environnement inconnu demeure une tâche difficile voire impossible pour un non-voyant sans recourir à une aide extérieure. Ces trois dernières décennies ont vu apparaître un certain nombre de dispositifs d'assistance utilisant de nouvelles technologies telles que les ultrasons, le laser, l'infrarouge, les RFID ou le GPS. Cependant, on constate que la diffusion de ces systèmes auprès des utilisateurs reste anecdotique.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet NAVIG¹ (Navigation assistée par vision embarquée et GNSS). Le projet NAVIG est un projet multidisciplinaire et novateur, à la fois fondamental et appliqué, qui a pour objectif d'augmenter l'autonomie des non-voyants et malvoyants dans une action primordiale, identifiée comme particulièrement problématique : La navigation (atteindre une destination en évitant les obstacles). Pour un non-voyant, se déplacer de manière autonome pour se rendre au travail, à un rendez-vous ou pour aller faire ses courses est une tâche cognitivement complexe qui nécessite nombre de comportements distincts. Downs et Stea [Downs & Stea 1977] divisent ce processus en quatre tâches : s'orienter dans l'environnement, choisir l'itinéraire, conserver le bon itinéraire et reconnaître que la destination est atteinte. Ces quatre étapes de la navigation pédestre sont rendues difficiles en l'absence de vision. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons uniquement aux problèmes liés à la mobilité et à l'orientation.

Dans le cadre de NAVIG, nous avons conçu un système électronique d'aide à la navigation capable d'assister une personne en situation de handicap visuel tout au long de la réalisation des différentes tâches d'un processus de navigation. Dans mon travail de doctorat, j'ai traité d'une façon plus approfondie les questions relatives aux problèmes de positionnement, de guidage et de suivi d'itinéraire.

Problématiques et Contributions

Les systèmes d'aide à la navigation ont pour objectif de permettre aux déficients visuels de se déplacer d'un point à un autre sur un parcours connu ou inconnu en utilisant différents types de capteurs (e.g. GPS pour localiser le piéton, boussole pour déterminer l'orientation). Les systèmes d'aide à l'orientation basés sur la géo-localisation ont fait beaucoup de progrès mais demeurent inopérants principalement à cause de leur trop faible précision pour les piétons. On peut aussi noter qu'ils sont plutôt centrés sur une approche de navigation « type voiture » et non pas sur une approche de guidage intuitif pour piéton, en relation avec les processus de la perception de l'espace, de la cognition spatiale, et de la navigation piétonne. Ces systèmes sont généralement basés sur trois composants essentiels :

1. Le consortium réunit trois laboratoires de recherche spécialisés en interaction et suppléance pour personnes handicapées (IRIT-ELIPSE), en vision humaine (CerCo), et en perception auditive, design sonore, cognition spatiale, ergonomie des interfaces homme-machines et réalité augmentée (LIMSI), ainsi que deux PME toulousaines actives dans les domaines de la vision artificielle (SpikeNet Technology) et de la géolocalisation (NAVOCAP), et un centre d'éducation spécialisée pour déficients visuels (CESDV - Institut des Jeunes Aveugles). Ces partenaires sont associés dans ce projet de recherche à portée industrielle pour parvenir à plusieurs objectifs fondamentaux et appliqués complémentaires.

- Un système de géo-localisation pour déterminer la position de l'utilisateur en continu et en temps réel.
- Un système d'information géographique pour calculer les itinéraires et extraire les informations nécessaires à la navigation et, potentiellement, à la création d'une carte mentale de l'environnement.
- Une interface d'interaction adaptée.

L'état de l'art des systèmes existants montre que plusieurs améliorations relatives à chacun des composants précédemment décrits restent à réaliser afin de mettre en place un système utile et utilisable par des déficients visuels. Il apparaît nécessaire de trouver des solutions pour améliorer la précision de la localisation, créer des systèmes d'informations géographiques suffisamment complets et riches, adapter le guidage aux piétons DV et aussi utiliser des techniques de suivi d'itinéraire plus robustes et fiables. L'objectif de ce manuscrit est d'apporter des éléments de réponse à ces problématiques en les abordant selon trois axes principaux : le positionnement piéton, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et le guidage (suivi d'itinéraire).

Le positionnement piéton

La précision du système GPS dans de nombreux environnements, tels que les villes, est souvent supérieure à 10 mètres. Dans ces conditions, les systèmes d'aide à la navigation basés sur le GPS ne sont pas parfaitement utilisables car ils conduisent à des situations dangereuses (par exemple traverser en dehors des zones protégées) ou à des erreurs préjudiciables (par exemple emprunter la mauvaise rue). Une fusion entre le GNSS (Global Navigation Satellite System) et une centrale inertielle embarquée peut améliorer la précision du positionnement mais reste toujours inadaptée à un déplacement piéton. Afin d'améliorer suffisamment la précision de localisation, nous avons adopté une approche assez nouvelle en navigation humaine. En effet, l'estimation de localisation de l'utilisateur repose sur la fusion de données entre la géo-localisation par GNSS et une centrale inertielle, auxquelles nous rajoutons un système de vision artificielle embarqué. Notre approche repose sur l'amélioration du positionnement grâce à la détection d'indices visuels statiques par le biais d'un module de vision. L'utilisation d'une telle fusion permet d'avoir une position absolue nettement meilleure que celle déjà affichée par les systèmes commercialisés. De plus, elle est théoriquement facilitée par le fait qu'elle ne nécessite pas d'équiper l'environnement avec des capteurs ou des indices onéreux à mettre en place et à maintenir en état de marche. Une première version de ce moteur de fusion a été développée et évaluée dans des conditions réelles. Une erreur de 5 mètres à 95% du temps a été atteinte.

Les Systèmes d'Information Géographique

Le système NAVIG doit être capable de guider un piéton déficient visuel d'un point A vers un point B, en toute sécurité et avec précision, tout en lui fournissant des informations spatiales sur l'environnement qui l'entoure. Généralement, les SIG utilisés sont conçus pour être utilisés par des véhicules et sont inadaptés à une utilisation piétonne. A la suite de plusieurs brainstormings avec des utilisateurs non-voyants, nous avons défini 5 classes d'objets importantes pour assurer le déplacement des DV. Nous avons conçu un Système d'Information Géographique (SIG) adapté aux piétons non-voyants en ajoutant à la base de données géographiques les informations indispensables concernant : 1/ les zones piétonnes (trottoirs, passages piéton, etc.); 2/ les points d'intérêt permettant de se faire une représentation mentale de l'espace; 3/ les points de repères permettant une confirmation sur l'itinéraire emprunté; 4/ les amers visuels qui servent au module de

vision pour améliorer la localisation de l'utilisateur et 5/ les points difficiles comme les carrefours ou les traversées où une description et un guidage spécifique est nécessaire. En se basant sur cette classification, nous avons également conçu des outils de manipulation de la base de données spécifiques, en particulier pour le calcul d'itinéraire qui doit proposer un algorithme de sélection d'itinéraire incluant les besoins et les préférences des piétons déficients visuels. Un serveur SIG comportant tous ces composants a été implémenté et évalué.

Le suivi d'itinéraire

Afin de guider l'utilisateur avec un haut degré de précision, il est important d'utiliser des algorithmes de suivi adaptés à un déplacement piéton. Ces algorithmes diffèrent de ceux utilisés dans les systèmes GPS pour voitures car ils doivent être plus précis et plus robustes. En effet, l'itinéraire calculé est une suite de points géographiquement localisés que l'utilisateur doit valider au fur et à mesure de son déplacement. Cela permet au système de présenter les bonnes informations au bon moment, en évitant de procéder à de fausses annonces comme une traversée de rue qui n'existe pas ou plus problématique encore, une traversée non annoncée. Pour les systèmes GPS embarqués sur les véhicules, le suivi en lui-même est moins compliqué car une voiture est toujours supposée se trouver près du centre de la route, ce qui permet de contraindre la position estimée grâce à des algorithmes de map-matching. De plus, la vitesse d'un véhicule permet de s'affranchir d'une bonne partie de l'incertitude qui affecte l'estimation du déplacement d'un piéton entre deux calculs successifs de la position GPS (une erreur de positionnement de 10m est potentiellement plus problématique pour un déplacement de 2m que pour un déplacement de 15m). Il est donc important de proposer des algorithmes et des stratégies de suivi d'itinéraire adaptés à la navigation piétonne. Nous avons proposé 3 nouveaux algorithmes pour assurer le suivi d'un piéton lors de la réalisation d'un itinéraire.

L'évaluation en situation réelle de tels algorithmes pose de grosses difficultés en termes de sécurité (des utilisateurs participants) et de réalisme étant donné le nombre important de variables qu'il n'est pas possible de contrôler dans un tel système (en particulier la disponibilité et la précision des signaux GPS, le trafic, etc.). C'est pourquoi nous avons opté pour l'utilisation d'environnements virtuels comme outil de test et d'évaluation de ces algorithmes de guidage. Notre plateforme permet de générer un environnement virtuel (EV) représentant un espace réel, sur la base d'informations géographiques extraites d'Open Street Map (OSM) représentant par exemple un campus ou une ville. La plateforme intègre plusieurs modalités d'interaction en sortie permettant de concevoir et d'évaluer de nouvelles méthodes de guidage. L'objectif de cette plateforme est de tester dans un environnement contrôlé la précision et la robustesse des algorithmes de suivi proposés en vue de leur implémentation dans le système NAVIG. Ces tests ont permis de déterminer quels processus de suivi sont les plus efficaces pour compenser le mauvais positionnement GPS, tout en améliorant l'acquisition de connaissances spatiales dans le même temps. Une évaluation des trois algorithmes proposés, ainsi qu'une comparaison par rapport à la stratégie classique utilisée dans les systèmes d'aide à la navigation a été réalisée.

Plan de lecture

Ce travail de thèse s'intègre dans un cycle complet de conception, implémentation et évaluation d'un dispositif d'assistance à la navigation pour déficients visuels (DV).

- Dans le **chapitre 1**, nous poserons le cadre théorique de nos travaux. Nous présenterons des données statistiques sur la cécité, l'impact lié à cette cécité sur la qualité de vie des personnes déficientes visuelles. Nous présentons les difficultés spécifiques que peuvent rencontrer les déficients visuels lors d'une tâche de navigation dans un environnement inconnu.
- Le **chapitre 2** portera sur les systèmes d'aide à la navigation pour les DV. Nous détaillerons dans ce chapitre les principaux verrous scientifiques et technologiques à travers la description de plusieurs projets de recherche. Nous présenterons aussi quelques systèmes commercialisés pour essayer de mettre en avant les avancées techniques de ce type d'appareils et les problèmes rencontrés par leurs utilisateurs. Nous mettrons l'accent sur les systèmes de positionnement utilisés, le rôle du système d'information géographique, ainsi que quelques exemples de techniques d'interactions et d'interfaces utilisées. Nous finirons ce chapitre par une discussion générale afin de cerner les problèmes récurrents de ces systèmes.
- Dans le **chapitre 3** nous présenterons nos contributions dans le cadre du projet NAVIG. Nous présenterons d'une façon détaillée l'architecture du système complet avec les différents modules logiciels et matériels. Nous présenterons les résultats d'une étude des besoins réalisée en collaboration avec le LIMSI et l'Institut des Jeunes Aveugles (IJA) de Toulouse à laquelle une vingtaine d'utilisateurs ont participé. Nous présenterons les différents outils de prototypage rapide que nous avons utilisés ainsi que la version actuelle du prototype NAVIG. Je mettrai l'accent sur les composants qui étaient au centre de mon travail de doctorat, à savoir le module de positionnement, le serveur SIG adapté et les algorithmes de suivi proposés. Afin de valider nos hypothèses de conception, nous présenterons quelques résultats d'une évaluation récente de la deuxième version du prototype NAVIG.
- Dans le **quatrième** chapitre nous aborderons les raisons qui nous ont poussés à concevoir SIM4NAV, un environnement virtuel multimodal permettant de simuler et évaluer un système d'assistance à la navigation pour les déficients visuels. Nous présentons en premier lieu une étude exploratrice pour la configuration de l'interface haptic de SIMU4NAV. Puis et dans un deuxième temps, nous décrivons une évaluation des algorithmes de validation de points d'itinéraire menée avec 16 utilisateurs. L'objectif de cette évaluation était de déterminer la meilleure stratégie pour valider d'une façon optimale les points de passage d'un utilisateur piéton. Les résultats de cette évaluation seront présentés et discutés.

Pour finir, la conclusion générale dressera un bilan sur l'ensemble de nos contributions et présentera les multiples perspectives à ce travail de thèse.

Déficiences visuelles et impact sur la Mobilité et l’Orientation

Sommaire

1.1	La déficience visuelle : causes et types	6
1.2	Handicaps liés à la déficience visuelle	7
1.2.1	Accès à l’information textuelle	7
1.2.2	Perception de l’environnement	9
1.3	La cognition spatiale	13
1.3.1	Les représentations spatiales	13
1.3.2	La navigation piétonne	14
1.3.3	« Wayfinding » chez les déficients visuels	15
1.4	Navigation fine : les dispositifs d’aide à la mobilité	17
1.4.1	La locomotion chez les Déficiants visuels	17
1.4.2	Les dispositifs d’aides à la mobilité	19
1.5	Conclusion	22

Ce travail de thèse s’inscrit dans le domaine de l’aide aux déplacements pour les personnes en situation de handicap visuel. Il est donc nécessaire de présenter quelques notions en relation avec la déficience visuelle, les causes et les types de déficiences visuelles ainsi que leur impact sur la mobilité et l’orientation des personnes déficientes.

1.1 La déficience visuelle : causes et types

En 2012, et selon l'Organisation Mondiale de la Santé¹ (OMS) Il y a dans le monde près de 285 millions de personnes qui présentent une déficience visuelle, 39 millions d'entre elles sont aveugles et 246 millions sont malvoyantes.

En France, l'acuité visuelle est exprimée comme une fraction de l'acuité visuelle normale moyenne. L'acuité normale retenue correspond à un pouvoir de séparation (angle visuel minimal entre deux points pour qu'ils soient perçus comme distincts) de 1 minute d'arc.

Par exemple, une acuité de 1/10^{ème} signifie que l'acuité visuelle est 10 fois inférieure à la valeur normale. Cela signifie qu'un objet perçu à 100 mètres par un sujet ayant une vision normale doit être rapproché à 10 mètres du sujet déficient visuel pour être perçu de la même façon. En France, La cécité est définie légalement par un niveau de perception visuelle pour le meilleur œil en dessous de 1/20^{ème} après correction ou lorsque la largeur du champ visuel est inférieure à 20 degrés, quand la norme est de 180. Les origines de la cécité ou de la baisse de l'acuité visuelle peuvent être diverses. À l'échelle mondiale, les principales causes de déficience visuelle sont des défauts de réfraction non corrigés (myopie, hypermétropie ou astigmatisme) qui représentent près de la moitié des DV (43%) ensuite vient la cataracte avec 33% des déficients visuels. L'OMS a classé les déficiences visuelles selon l'acuité visuelle et le champ visuel résiduel. Cinq catégories de déficiences visuelles numérotées de 1 à 5 ont ainsi été définies :

- Catégorie 1 : Acuité visuelle binoculaire corrigée inférieure à 3/10^{ème} et supérieure ou égale à 1/10^{ème} avec un champ visuel d'au moins 20°.
- Catégorie 2 : Acuité visuelle binoculaire corrigée inférieure à 1/10^{ème} et supérieure ou égale à 1/20^{ème}. En pratique, les sujets comptent les doigts de la main à trois mètres. Les trois catégories suivantes correspondent à la notion de cécité :
- Catégorie 3 : Acuité visuelle binoculaire corrigée inférieure à 1/20^{ème} et supérieure ou égale à 1/50^{ème}. En pratique, le sujet compte les doigts à un mètre mais ne peut le faire à trois mètres.
- Catégorie 4 : Acuité visuelle binoculaire corrigée inférieure à 1/50^{ème} mais perception lumineuse préservée. En pratique, le sujet ne compte pas les doigts à un mètre ou champ visuel inférieur à 5°.
- Catégorie 5 : Cécité absolue. Pas de perception lumineuse. A fortiori absence d'œil.

Les catégories 1 et 2 correspondent à ce qu'il est convenu d'appeler la malvoyance. On parle aussi de basse vision ou d'amblyopie ou encore de vision réduite. En tout état de cause, les critères d'évaluation reposent toujours sur une baisse d'acuité visuelle ou sur une diminution du champ visuel.

Selon l'enquête HID², aujourd'hui, on estime à environ 1 854 000 le nombre de personnes atteintes de déficits visuels en France. Parmi ces déficients visuels, près de 612 000 personnes sont malvoyants légers 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). 159 000 personnes sont malvoyants profonds (catégorie 2). Enfin 66 700 personnes sont non-voyants (catégories 3, 4 et 5).

Une étude du ministère de la santé française a permis d'estimer le nombre de déficients visuels adultes dont l'autonomie est insuffisante pour se déplacer sans être accompagné. L'enquête a montré que la catégorie 1 et une partie de la catégorie 2 peuvent se déplacer

1. <http://www.who.int/fr/>

2. HID : Handicap- Incapacités- Dépendances. (Les personnes ayant un handicap visuel - Les apports de l'enquête Handicaps - Incapacités - Dépendance, 2005)

sur tous les itinéraires avec une gêne plus ou moins importante, il s'agit de personnes n'utilisant pas d'aide (cane ou chien guide) et ayant une vue suffisante pour éviter les obstacles courants. Les personnes entrant dans les catégories 3, 4 et 5 ont une autonomie partielle - limitée à quelques trajets connus - ou totalement inexistante. Parmi les personnes dépendantes, on trouve aussi des membres de la catégorie 1 et 2 lors d'une association avec une seconde pathologie ou un âge élevé.

Avec le vieillissement de la population et l'augmentation globale et régulière de l'espérance de vie, l'OMS estime que le nombre de personne atteintes de déficiences visuelles devrait doubler au cours des 30 prochaines années.

1.2 Handicaps liés à la déficience visuelle

La perte d'autonomie est la perte de capacité ou la perte du droit à choisir librement sa conduite. Dans un monde aussi visuel que le nôtre, la déficience visuelle génère des handicaps importants dans plusieurs grands domaines d'activité. Un rapport de l'Institut National Canadien des Aveugles [Gold & Simson 2005] montre clairement que le premier besoin, non satisfait des personnes souffrant de handicap visuel est le transport et les déplacements. Plusieurs autres besoins ont été identifiés comme la communication écrite et la cognition spatiale (compréhension de l'environnement, localisation d'objets, saisie d'objets). Ces handicaps ont alors des répercussions dans plusieurs grands domaines sociétaux tels que l'accès à l'information, l'inclusion dans les sphères professionnelles ou associatives, l'accès à la culture et aux loisirs, etc. Dans cette section nous allons aborder les trois besoins fondamentaux qui s'articulent autour de :

- L'accès à l'information,
- La perception de l'environnement
- La navigation

Ayant comme objectif de proposer un système électronique d'aide à la navigation, ce travail est donc plus orienté vers les problèmes d'actions dans l'environnement. Cependant, nous présentons brièvement les deux premiers besoins ainsi que leur impact sur la qualité de vie des personnes déficientes visuelles. Dans un second temps, nous présentons d'une façon non exhaustive quelques dispositifs qui ont été proposés pour assister les DV dans ces deux besoins.

1.2.1 Accès à l'information textuelle

L'accès à l'information est l'un des besoins fondamentaux des DV. En effet, lire son quotidien, ses courriers ou factures est une tâche difficile voire impossible selon le degré de déficience visuelle. Dans la navigation, lire le nom des rues, les plaques de directions reste aussi une tâche impossible. L'accès à l'information peut aussi être un frein à l'insertion dans la société ou à l'éducation. En effet pour ce qui est des jeunes, la proportion d'étudiants déficients visuels en cycle supérieur est encore trop faible : un millier d'étudiants a été recensé en 1997/1998, 185 aveugles et 810 malvoyants sur un total de près d'1 million et demi d'étudiants.

Pour y remédier ou essayer d'apporter une solution, il existe aujourd'hui de nombreux dispositifs liés à l'accessibilité de l'information (lecture et écriture) pour les personnes non-voyantes. Ces systèmes sont largement basés sur la somesthésie (en convertissant l'image ou le texte présent sous un capteur de vision artificielle (caméra, scanner) en stimuli tactiles (relief) ou auditifs (moteurs de synthèse transformant une chaîne de caractères en parole).

Pour utiliser un ordinateur, les personnes atteintes de déficience visuelle utilisent généralement un lecteur d'écran qui est un logiciel qui retranscrit par synthèse vocale et/ou sur un afficheur braille ce qui est affiché sur l'écran et permet d'interagir avec le système d'exploitation et les autres logiciels. Le lecteur d'écran a un rôle de pilotage en envoyant l'information soit vers la synthèse vocale soit vers l'afficheur Braille. L'afficheur braille (figure 1.1) est un dispositif électromécanique utilisé pour afficher en temps réel des caractères Braille. Ces caractères apparaissent sous forme de points saillants sur une surface plane. On parle également de plage tactile braille, de plage tactile, de plage braille à affichage éphémère, d'afficheur braille.

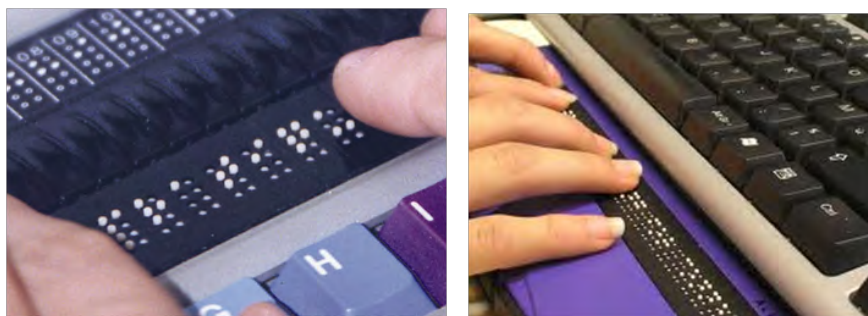


FIGURE 1.1 – L'afficheur braille.

Il existe aussi des imprimantes braille, dites embosseuses Braille, qui permettent d'imprimer sur un support papier du texte en braille, elles impriment en relief en perforant la feuille et non pas avec de l'encre. Il s'agit de créer des bosses dans le papier qui représentent les lettres en Braille.

L'accès aux informations géographiques est aussi possible pour les DV à travers des plans en reliefs pour représenter la topographie ou d'autres caractéristiques. Parmi les techniques utilisées pour la réalisation des cartes en relief, il y a la technique du papier thermo-gonflé. Cette méthode fonctionne avec une imprimante normale, un papier spécial et un four (voir figure 1.2). Le plan est dessiné sur l'ordinateur et ensuite imprimé sur un papier qui contient dans son revêtement des microcapsules d'alcool. Quand il est passé dans le four, les capsules d'alcool s'agrandissent uniquement aux endroits où de l'encre est présente, le papier gonfle et le relief apparaît. Pour explorer la carte les non-voyants utilisent généralement leurs deux mains.

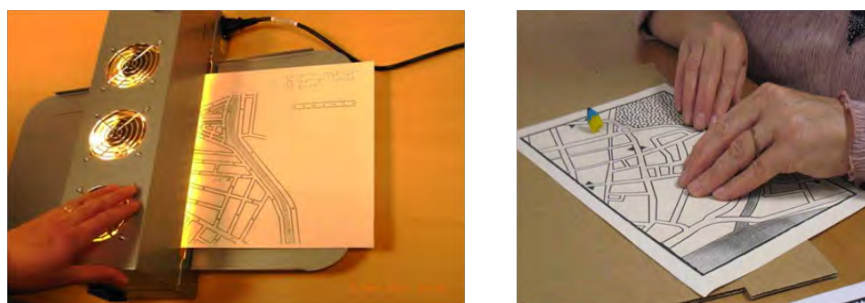


FIGURE 1.2 – A gauche un four pour la production de plans avec du papiers thermo-gonflables. A droite un non-voyant explorant une carte en relief.

1.2.2 Perception de l'environnement

En l'absence de vision, la perception de l'espace devient un challenge quotidien pour les déficients visuels qui doivent donc utiliser les autres modalités sensorielles (sonore, tactile, olfactive, kinesthésique) afin de percevoir et de comprendre leur environnement. Il existe des systèmes d'assistance qui ont pour objectif de traduire les informations visuelles en informations compréhensibles par d'autres modalités sensorielles, notamment tactile ou sonore. Généralement, l'approche adoptée repose sur trois phases représentées par la figure 1.3.

- L'acquisition d'information par des capteurs,
- Le traitement des informations collectées,
- La restitution de ces informations à travers une autre modalité sensorielle.



FIGURE 1.3 – Schéma de fonctionnement d'un dispositif de perception. Le capteur acquiert l'information qui est traitée puis restituée à l'utilisateur.

Dans la littérature, deux approches coexistent. La première est une approche holistique, dans laquelle on cherche à restituer l'ensemble de l'environnement. La seconde est une approche plus ciblée qui s'appuie sur la reconnaissance d'objets pour restituer uniquement une partie de l'environnement pour répondre à un besoins précis et identifié.

1.2.2.1 Substitution sensorielle : approche holistique

Les approches holistiques ont vu le jour depuis les années 1960. L'idée qu'elles développent consiste à transcrire dans une autre modalité (tactile ou sonore) l'ensemble des informations visuelles collectées depuis l'environnement en réduisant la résolution de l'image de départ. La figure 1.4, représente à gauche l'image d'un environnement capturé par une caméra. Celle de droite représente une analogie visuelle de ce qui serait présenté à un déficient visuel à l'aide d'une autre modalité sensorielle.



FIGURE 1.4 – Le principe des approches holistique en essayant de présenter l'ensemble des informations de l'environnement (gauche) par une diminution de la résolution (droite)

Pour illustrer l'approche holistique, nous allons nous limiter à présenter deux dispositifs, le TVSS (1969), avec une interface de restitution tactile et The vOICe (1992), basé sur une interface de restitution sonore.

En 1969, Paul Bach-y-Rita [Bach-y Rita *et al.* 1969], propose le TVSS (figure 1.5), un dispositif de conversion des informations visuelles capturées par une caméra en des

sensations tactiles à la surface du corps. Cette première étude montre qu'il est possible de stimuler le système tactile humain pour percevoir des formes. Le dispositif est composé d'une caméra fixée sur un trépied et d'une chaise de dentiste sur laquelle quatre matrices d'électrodes ont été installées de telle façon que le sujet perçoive les sensations générées sur son dos. Une première évaluation a montré les limites d'un tel système, notamment à cause de la faible résolution des sensations tactiles sur le dos.

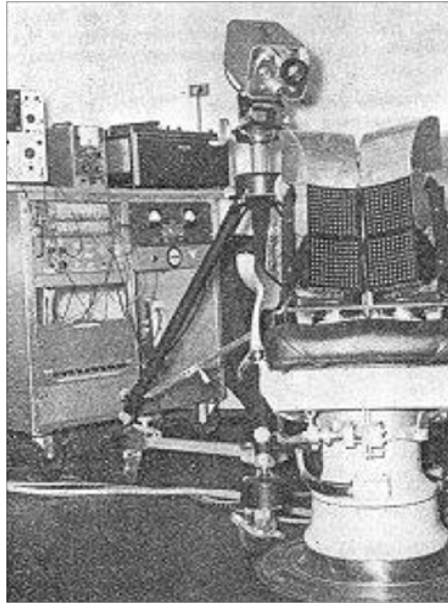


FIGURE 1.5 – Première implémentation du TVSS avec une matrice de stimulation électro-tactile dans le dos. Le sujet s'asseyait dans la chaise et percevait des sensations à la surface de la peau en relation avec la scène visuelle capturée par une caméra fixe.

Pour améliorer la sensibilité, [Bach-y Rita *et al.* 1998] propose de placer la matrice d'électrode (49 électrodes électro-tactiles espacées de 2,54 mm, chacune mesurant 0,89 mm de diamètre) sur la langue, un des organes avec la plus forte densité de récepteurs tactiles, pour bénéficier d'une grande résolution de stimulation. Bach-y-Rita [Bach-y Rita 1983] a montré par la suite que l'interaction avec le capteur (la manipulation de la caméra par l'utilisateur lui-même) était nécessaire pour mieux comprendre la scène visuelle. Une nouvelle version du TDU a été proposée par [Bach-y Rita & W Kercel 2003] (voir la figure 1.6) dans cette version, la camera est placée sur le front de l'utilisateur pour être synchronisée avec les mouvements de la tête.

Ces dispositifs ont été extensivement étudiés en conditions de laboratoire afin de mettre en évidence la perception de formes simples [Bach-y Rita *et al.* 1969]. Par contre ; ils ont été rarement évalués dans le cadre d'une tâche de compréhension globale d'un environnement ou de navigation par manque de portabilité ou parce que l'information reçue est difficilement interprétable malgré une charge cognitive considérable.

En parallèle aux expériences de stimulation tactile, plusieurs groupes ont proposé des systèmes qui permettent la perception de l'environnement par le biais de l'audition. En 1992, [Meijer 1992] propose 'The vOICE', (figure 1.7) un dispositif capable de convertir chaque pixel de l'image en un son tenant compte de sa position dans l'image et de son intensité lumineuse. La position verticale est codée en fréquence (résolution de 64 fréquences différentes). Plus le pixel est haut dans l'image et plus le son est aigu ; plus le pixel est bas, plus le son est grave. La position horizontale est codée de manière temporelle : chaque

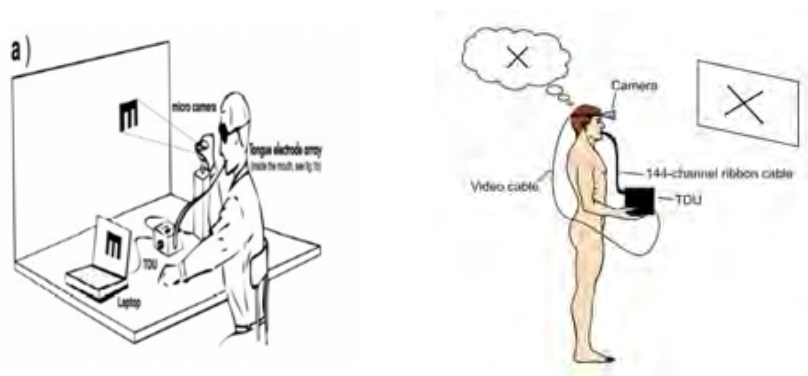


FIGURE 1.6 – A gauche, le sujet tient la camera dans la main et a sur sa langue la matrice d'électrodes. A droite, la camera est placé sur le front

image est scannée en une seconde et seul un secteur de l'image est sonifié à chaque instant. La "résolution" auditive de l'image est de 64 pixels en largeur. Chaque tranche de $1/64^{\text{ème}}$ d'image est ainsi sonifié une fois en une seconde pendant $1/64$ de seconde. La luminance d'un pixel (valeur en niveaux de gris) est codée en intensité du son émis : plus un pixel est clair, plus son intensité sera élevée. Par conséquent, un silence veut dire noir et un son fort veut dire blanc. Toutes les intensités intermédiaires correspondent à des nuances de gris.

The vOICe a été évalué dans des tâches de localisation (une boîte noire de $11 \times 11 \times 1$ cm) et de catégorisation d'objets (10 objets avec chacun 9 variantes aux contenus dans l'image très semblables). Les objets sont disposés sur une table blanche et les sujets se tiennent à 1 mètre environ de la table avec une caméra dans la main. Chaque image est convertie en signaux auditifs par le système 'The vOICe'. Les résultats présentés dans la thèse de Malika Auvray [Auvray 2004] montrent qu'il est possible de localiser et reconnaître des objets : le temps de localisation d'une cible est en moyenne de 100 ± 70 secondes avec une erreur de 7 ± 5 cm. Les sujets arrivent à catégoriser les objets en énumérant en moyenne 1 objet et demi en 39 ± 27 secondes avant de trouver l'objet correct. Cette expérimentation montre qu'il est possible en agissant sur la caméra, de localiser et de reconnaître des objets appris. Ces deux tâches nécessitent cependant beaucoup de temps et les conditions dans lesquelles ont été effectués les tests montrent la difficulté de les utiliser en environnement réel. Ces résultats montrent clairement l'impossibilité d'utiliser un tel système dans une tâche de navigation.



FIGURE 1.7 – Le dispositif 'The vOICe' avec les lunettes équipées de caméras et les écouteurs pour la restitution de l'information.

Il existe d'autres systèmes qui tentent de substituer la vision par l'audition comme le système PSVA [Arno *et al.* 1999] ou le système EAV de l'université de la Laguna aux

Canaries [González-Mora *et al.* 2006]. Tous ces projets ont un même objectif fondamental : substituer la vision par une autre modalité sensorielle afin de proposer à leurs utilisateurs une perception globale de leur environnement.

Il est évident que ces systèmes représentent une grande avancée afin de mieux comprendre le fonctionnement de la perception humaine ainsi que la substitution sensorielle (notamment les phénomènes de plasticité cérébrale et d'adaptation). Cependant l'utilisabilité de ces systèmes est très mauvaise (voire nulle) dans des environnements naturels. A part quelques exceptions, ils ne sont d'ailleurs jamais utilisés par les déficients visuels.

1.2.2.2 Approche par localisation d'objets

L'approche par localisation d'objets consiste à sélectionner une partie de l'information recueillie à partir de l'environnement pour ne restituer que celle-ci. Cette approche repose principalement sur deux fonctions fondamentales qui sont 1/ la reconnaissance d'objets par vision artificielle et 2/ la localisation de ces objets. En effet pour pouvoir restituer l'emplacement d'une fenêtre dans une chambre par exemple, il faut à la fois reconnaître la fenêtre dans l'environnement et pouvoir déterminer sa position. L'information peut ensuite être transmise à l'utilisateur par le biais d'une modalité sensorielle préservée sonore, ou kinesthésique. Dans la littérature, plusieurs systèmes basés sur la localisation d'objet existent. Pour illustrer cette approche nous allons présenter deux systèmes. Le premier, CAVIAR (2012) dispose d'une interface de restitution tactile tandis que le second, proposé par Dramas [Dramas 2010] est basé sur une interface de restitution sonore.

CAVIAR [Bahram *et al.* 2012] est un dispositif de saisie d'objet basé sur les stimulations tactiles. La perception de l'espace se fait à travers la localisation d'objets d'intérêts et non pas par la présentation de tout l'environnement. La discrimination ainsi que la localisation d'objet est réalisée au moyen d'un algorithme simple embarqué dans un téléphone mobile tournant sous le système d'exploitation Android. Quant à la restitution de l'information, le système CAVIAR est équipé d'un bracelet avec 4 vibreurs autour du poignet qui permettent de guider la main de l'utilisateur jusqu'à l'objet détecté et localisé dans l'espace. La figure 1.8 représente le prototype CAVIAR.

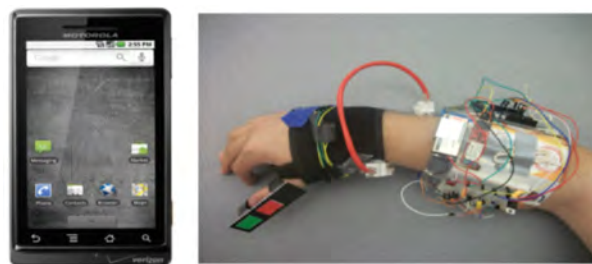


FIGURE 1.8 – Le prototype CAVIAR de guidage vers des objets d'intérêt par stimulation tactile.

Dans sa thèse [Dramas *et al.* 2010] propose un dispositif de localisation d'objets basé sur la vision artificielle et les sons spatialisés. La localisation des objets d'intérêt se fait à travers une caméra binoculaire placée sur la tête (via un algorithme de reconnaissance d'image supervisé) Et l'information est restituée à l'utilisateur sous forme de sons spatialisés. La figure 1.9 illustre le système présenté par (Dramas, 2010) dans lequel l'utilisateur demande au système où est l'objet (une tasse), le système localise l'objet (la tasse) par reconnaissance de formes et reconstruction tridimensionnelle. Un son synthétisé comme s'il provenait de l'objet lui-même (la tasse) est alors émis dans un casque audio.

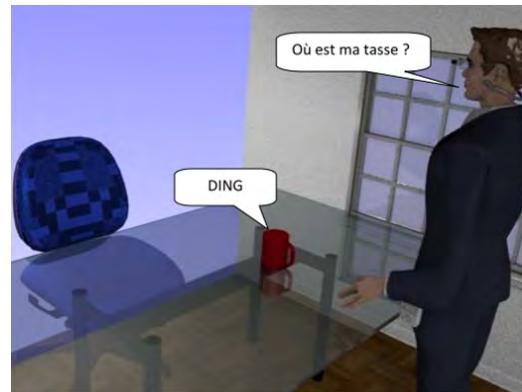


FIGURE 1.9 – du fonctionnement du prototype de reconnaissance et de localisation d’objets.

Bien que ces systèmes se basent sur une approche de substitution plus limitée (l’environnement n’est pas présenté dans sa globalité), elle nous semble plus intéressante et plus efficace comparé aux approches holistiques.

1.3 La cognition spatiale

La cognition spatiale représente l’ensemble des processus perceptifs, cognitifs et moteurs qui permettent d’appréhender l’espace et d’en construire une représentation mentale. Ces représentations mentales de l’espace peuvent alors être manipulées (mentalement) pour accomplir des tâches comportementales comme, par exemple, trouver un itinéraire vers un point connu.

1.3.1 Les représentations spatiales

Nous avons tous une représentation mentale (appelée parfois carte cognitive) de notre environnement. Cette représentation est construite en se basant sur des informations provenant de nos différents systèmes sensoriels. Ces entrées sensorielles reflètent d’une part directement notre l’environnement, grâce à la perception que nous avons des objets assez proches pour être touchés, sentis, entendus ou vus ; et proviennent d’autre part, des informations géographiques fournies par des sources plus indirectes tels qu’internet, les livres, la télévision, la radio, les journaux, les cartes, les maquettes ou simplement la conversation. Pour [Garling & Golledge 2000] la connaissance et la compréhension de l’environnement jouent un rôle fondamental en permettant aux personnes de planifier et d’effectuer leurs déplacements. Ces processus évoluent avec l’âge, l’expérience et l’apprentissage mais aussi évidemment, avec l’apparition de déficiences sensorielles. Une représentation spatiale est donc une abstraction mentale plus ou moins correcte d’un environnement, élaborée par un individu à un moment donné. Elle peut être considérée comme un modèle interne du monde dans lequel nous vivons. Selon [O’Keefe & Nadel 1978] deux types de représentations appelées « carte » et « route » existent et sont caractérisées comme présenté dans le tableau 1.3.1.

La représentation de type **route** est élaborée dans un cadre de référence égocentré, c’est à dire dans un système de coordonnées intégrant les axes du corps du navigateur. La connaissance de l’espace se fait à partir de l’enregistrement séquentiel de points de repère à mesure que l’individu navigue dans cet espace (e.g. l’exécution d’un trajet). Ce type de connaissance est peu plastique, dans le sens où il ne peut pas être réorganisé. Ces points sont décrits de façon séquentielle plutôt que spatiale. Ainsi chaque segment est essentiel

TABLE 1.1 – Différentes caractéristiques entre les représentations carte et route selon [O’Keefe & Nadel 1978]

	Route	Carte
Motivation	La représentation est créée avec la destination finale comme objectif	La curiosité est à l’origine de ce type de représentation
Flexibilité	Plutôt rigide, inutilisable si une partie est manquante	Extrêmement flexible, robuste à la perte d’information
Vitesse d’acquisition	Très rapide	Relativement lente
Contenu informationnel	Peu, chaque route contient une petite quantité d’information	Très riche, avec une large capacité
Accès à la représentation	Pas de connaissance spéciale ni de stratégie de codage	Connaissance spéciale pour coder les informations sont nécessaires
Manipulation	Aucune possible	Facile, comparaison avec d’autres cartes possibles

parce qu’il suit le précédent et mène au suivant. Si un des éléments de la chaîne manque pour une quelconque raison, l’individu se perd. Cette représentation semble être suffisante quand on se déplace dans des lieux familiers.

La représentation de type **carte** est une représentation d’ensemble élaborée dans un cadre de référence allocentré, c’est à dire dans lequel le système de coordonnées est externe. Cette représentation est basée sur une connaissance des propriétés topographiques de l’environnement, impliquant la localisation d’objets par rapport à un système de coordonnées fixe. C’est donc une représentation indépendante de la position de l’individu. Le rôle de la représentation de type carte est crucial dans la capacité du navigateur à déterminer la configuration des lieux situés en dehors de son champ de vision ou à établir des relations spatiales entre des lieux qui n’ont pas été explorés physiquement. L’organisation d’une représentation de type carte est souvent de type hiérarchique, c’est-à-dire que l’espace est divisé en zones et que chaque zone est décrite l’une après l’autre. La représentation de type carte, contrairement à la représentation de type route, permet une réorganisation des informations spatiales (détours, raccourcis, etc.).

1.3.2 La navigation piétonne

Pour [Downs & Stea 1977] le terme « navigation » définit le comportement de déplacement orienté vers un but, avec tous les processus moteurs, sensoriels et cognitifs qu’il implique. [Downs & Stea 1977] proposent de diviser ce processus de navigation en quatre tâches : s’orienter dans l’environnement, choisir un itinéraire, suivre cet itinéraire et reconnaître que la destination est atteinte.

- La première étape (orientation) correspond à la connaissance du lieu où le navigateur se trouve par rapport à d’autres lieux devant être connus au préalable. Cette étape d’orientation, aussi appelée sens de la direction, permet de savoir où l’on se trouve et comment on est orienté par rapport à l’environnement.
- La deuxième étape (choix de l’itinéraire) exige que le navigateur fasse un lien cognitif entre le point de départ (par exemple l’emplacement actuel du voyageur) et la

destination souhaitée, et choisisse un itinéraire qui relie ces deux points. Dans de nombreux environnements, il est difficile d'atteindre directement une destination. Il existe de multiples obstacles, comme par exemple les immeubles ou les rivières, qui empêchent le navigateur de progresser en ligne droite. Un réseau de possibilités permet alors de calculer des itinéraires indirects, qui sont en général multiples. Le choix du chemin à emprunter dépend alors de nombreux facteurs externes comme par exemple la distance comparée des routes, et de facteurs subjectifs comme le sentiment de sécurité, la simplicité, le stress généré par certaines étapes, ou les points d'intérêts qui s'y trouvent. Le choix peut également être effectué avant de se rendre sur le point de départ [Timpf *et al.* 1992], ce qui permet d'obtenir des instructions de navigation incluant des points de décision et des orientations.

- La troisième étape (conserver le bon itinéraire), consiste à s'assurer pendant le déplacement que l'on se trouve bien sur l'itinéraire choisi. Ceci implique que le voyageur fasse les bons choix au niveau des points de décision. Ceci faisant, le voyageur évalue constamment son orientation dans l'environnement et se re-positionne dans sa carte cognitive. Les repères jouent un rôle important dans cette tâche et sont vérifiés régulièrement. De plus, le navigateur doit souvent s'écarter temporairement de l'itinéraire choisi, par exemple pour emprunter les trottoirs ou éviter les obstacles.
- La quatrième étape, qui consiste à reconnaître la destination, achève le processus de navigation.

Adams [Adams 1997] propose un modèle qui présente la tâche de « navigation » humaine selon trois phases : la planification préliminaire de l'itinéraire, la navigation globale et la navigation fine.

- La première phase est "la planification préliminaire" qui consiste à choisir le chemin à emprunter pour atteindre la destination choisie ; en d'autre terme, décider quel est le chemin pour s'y rendre.
- La deuxième phase est "la navigation globale" qui consiste à relier entre eux les différents points de repère qui constituent le chemin sélectionné dans la première phase- tout en déterminant la direction à emprunter à ces différents points de repères pour atteindre les prochains jusqu'à l'arrivée prévue.
- La troisième et dernière phase est "la navigation fine", cette étape consiste à affronter les difficultés grâce aux techniques de locomotion acquises par les DV lors de formations. Ces obstacles peuvent être de l'ordre d'une marche à franchir, mais aussi d'un autre niveau comme de gérer une traversée de rue qui inclut par exemple un passage piéton, un feu tricolore et le trafic routier.

Les deux descriptions proposées par [Adams 1997] et [Downs & Stea 1977] se recouvrent et sont complémentaires. En effet la phase de planification proposée par Adams (1997) contient les phases d'orientation et de choix de l'itinéraire de Downs et Stea (1977). Les étapes suivantes de Downs et Stea (conserver l'itinéraire, reconnaître la destination) sont toutes deux incluses dans la navigation globale d'Adams. La notion qui apparaît alors est celle de navigation fine qui prend toute son importance chez les déficients visuels car elle fait référence aux changements de locomotion lorsque le piéton doit franchir des difficultés.

1.3.3 « Wayfinding » chez les déficients visuels

Il est évident qu'en l'absence de vision, le processus de navigation devient très complexe. En effet les 4 tâches (s'orienter dans l'environnement, choisir l'itinéraire, conserver le bon itinéraire, et reconnaître que la destination est atteinte) de ce processus sont chacune

fortement impactées.

Jacobson, [Jacobson 1993] définit la formation en "orientation et mobilité" comme l'enseignement des connaissances, des concepts et des techniques nécessaires à une personne avec une déficience visuelle pour se déplacer en toute sécurité, efficacement et avec élégance à travers n'importe quel environnement et dans toutes les conditions. Le terme « orientation » est défini par Foulke [Foulke 1971], et Brabyn [Brabyn 1982] comme le fait de savoir où l'on est, en termes de référence absolues. Tandis que la « mobilité » est la capacité de voyager en toute sécurité, confortablement, gracieusement et en toute indépendance dans l'environnement. En 1986, le groupe de travail sur les systèmes d'aide à la mobilité pour les personnes non-voyantes aux Etats-Unis [Working Groupe on Mobility Aids for the Visually Impaired 1986], propose les définitions suivantes :

- l'orientation consiste à utiliser les modalités sensorielles non visuelles pour déterminer sa position par rapport aux objets significatifs dans l'environnement.
- la mobilité est le mouvement d'un endroit à un autre entrepris pour atteindre une destination, implicitement impliquant l'évitement d'obstacles.

Afin de s'orienter dans son environnement, [Loomis *et al.* 2001] proposent deux stratégies. La première se base sur les points de repère : **Landmark based navigation**. Dans cette première stratégie, les points de repères représentent des indices à travers lesquelles le DV arrive à s'orienter. Par contre, l'acquisition d'informations concernant l'emplacement des points de repères est basé essentiellement sur la modalité sonore ou tactile, ce qui entraîne une difficulté importante pour garder une orientation correcte du fait de la diminution des repères disponibles. Dans la deuxième stratégie : **Path integration**, la personne doit déterminer son emplacement en intégrant en temps réel son propre déplacement par rapport à une position initiale connue. Pour les déficients visuels, cette intégration de trajet s'appuie sur des informations vestibulaires (translations et rotations) et proprioceptives (nombre de pas, vitesse de la marche, etc.). Ces différents indices sont intégrés pour essayer de garder une information d'orientation tout au long de la réalisation du trajet.

Le choix de l'itinéraire est généralement une étape qui précède l'action de navigation. La préparation d'itinéraires apparaît primordiale puisque la plupart des déficients visuels ressentent du stress et de l'anxiété à l'idée de se déplacer dans un environnement inconnu. La préparation d'itinéraire inclut les étapes préliminaires d'acquisition de connaissances spatiales au travers des cartes par exemple ainsi que la phase de planification qui permet de choisir l'itinéraire en fonction des facteurs subjectifs et externes. La présence de points de repères non-visuels dans l'itinéraire choisi est d'une importance capitale. Ces points de repères vont servir à la fois de points de décision (pour un changement de direction par exemple) mais aussi de points de confirmation qui permettent de s'assurer que le bon choix a été réalisé.

Conserver le bon itinéraire est aussi une tâche qui peut sembler triviale pour un voyant mais devient très problématique sans vision. Elle peut être divisée en deux sous-tâches : la première consiste à garder le cap sur une section droite alors que la deuxième consiste à prendre les bonnes décisions lors des changements de direction. Pour la première sous-tâche, les déficients visuels V utilisent généralement des techniques apprises en formation comme suivre les bords des trottoirs avec la canne ou rester aligné par rapport à la route en suivant les bruits de voitures. Quant aux prises de décision pour les changements de direction, elles sont généralement associées à des repères tactiles, (par exemple des bandes rugueuses au sol), sonores (que les DV ont déjà appris lors de la planification de l'itinéraire en amont) ou même à une convergence entre les repères tactiles et sonores.

Reconnaitre la destination finale est la dernière étape du processus de navigation. Comme pour les changements de direction, reconnaître la destination peut se faire par le biais de perception d'indices tactiles (les indices podo-tactiles sont souvent cités et correspondent à un changement de déclivité ou de revêtement sur le sol) ou sonores. Selon un rapport du groupe de travail sur les systèmes d'aide à la mobilité pour les personnes non-voyantes aux Etats-Unis [Working Groupe on Mobility Aids for the Visually Impaired 1986], les capacités de navigation des DV dépendent principalement des facteurs suivants :

- Facteurs psychosociaux : les personnes déficientes visuelles qui reçoivent une meilleure formation en orientation et mobilité ont de meilleures performances de navigation. Selon des observations faites aux USA, l'attention des formateurs en locomotion est souvent focalisée sur les jeunes sujets alors que les 2/3 de la population des DV sont des personnes âgées de plus de 65 ans. De plus, les malvoyants reçoivent plus d'attention que les non-voyants.
- Facteurs sensoriels : les capacités motrices des sujets dépendent fortement de leurs capacités visuelles résiduelles et de leurs capacités auditives.
- Les facteurs cognitifs rassemblent les différents processus qui permettent d'utiliser des échos, des indices et des points de repères pour se construire une image mentale de l'environnement. Les méthodes de traitement de ces indices sont propres à chaque sujet.
- Les facteurs environnementaux : la qualité d'un environnement (urbain ou rural), les conditions climatiques, la connaissance préalable de cet environnement, etc., ont des effets importants sur l'exécution de la tâche de navigation d'un DV.

Dans la section suivante, nous présentons quelques systèmes d'aide à la navigation fine. Il s'agit de dispositifs électroniques dédiés principalement aux problèmes de ma mobilité et à l'évitement d'obstacles. Ce travail de thèse traite, cependant, d'une façon plus approfondie des problèmes liés à la navigation globale des déficients visuels. Nous consacrons donc le deuxième chapitre de ce manuscrit à décrire en détail les systèmes d'aide à la navigation pour l'assistance globale.

1.4 Navigation fine : les dispositifs d'aide à la mobilité

En l'absence de vision, la navigation est une tâche relativement complexe à réaliser, qui engendre un stress important. En effet, la vision fournit des informations sur la disposition des espaces proche et lointain ainsi que des informations sur les déplacements réalisés [Foulke 1971], [Strelow ER. 1985]. Par conséquent, et malgré l'utilisation du chien-guide ou de la canne blanche, elle reste quasiment impossible et dangereuse lorsque le trajet est inconnu ou ne comporte pas suffisamment d'indices non-visuels. Pour tenter de faciliter une telle tâche ainsi que de remédier à certains problèmes (ex. éviter les obstacles), les dispositifs d'aide à la navigation ont vu le jour. Cependant, l'utilisation d'un système d'aide à la mobilité ou à l'orientation passe par un apprentissage de la locomotion en l'absence de vision. Dans la section suivante nous allons présenter quelques notions de base de la locomotion puis quelques systèmes d'aide à la mobilité.

1.4.1 La locomotion chez les Déficiants visuels

Selon un rapport du CERTU, tout déplacement porte en lui des besoins en :

- sécurité : éviter les accidents de circulation, éviter les chutes et les chocs.
- localisation : où suis-je, sur quoi, entre quoi et quoi ?

- orientation : suis-je sur la bonne trajectoire, dans la bonne direction, dans le bon sens ?
- information : qu'y a-t-il autour de moi en termes d'infrastructures d'activités ou d'informations écrites disponibles ?

Se déplacer en milieu urbain est une opération délicate et qui est loin d'être spontanée. Un DV ne peut y arriver qu'au prix d'un entraînement poussé. Cet apprentissage du déplacement non visuel est long et nécessite l'acquisition de nombreuses connaissances et de réflexes cognitifs spécifiques. La locomotion est donc 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 stratégies. En d'autres termes la locomotion sans vision fait appel à des capacités que va devoir développer le DV afin d'assurer les besoins précédemment cités. Traditionnellement, les DV utilisent la canne blanche (longue) ou le chien guide pour leurs déplacements autonomes. En effet l'utilisation optimale d'un chien guide passe par une maîtrise totale des règles de la locomotion.

Ceci se fait généralement par le biais d'une rééducation que l'on appelle formation en locomotion. Les principales techniques de locomotion associées à l'utilisation d'une canne longue ont été développées par Richard Hoover [[Hall of fame : Richard edwin hoover 2012](#)] aux Etats-Unis entre 1935 et 1950. 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 [[Ronzel et al. 2009](#)]. Parmi les règles de locomotion enseignées en France :

- Savoir balayer avec la canne blanche devant soit : apprendre à faire glisser la canne devant soi tous en gardant une symétrie de balayage par rapport à l'axe corporel. La synchronisation avec les pas est très importante ; il faut bien interpréter les indices obtenus par ce balayage et aussi analyser la nature du sol d'une manière fine.
- Savoir analyser l'information sonore pour gérer la circulation et les repères qui peuvent être perçus par la canne.
- Reconnaître à partir d'indices non visuels la structure de l'urbanisation. L'idéal étant de pouvoir se représenter mentalement le plan de la ville.

Il est communément admis que les déficients visuels compensent l'absence d'information visuelle par une utilisation accrue des informations fournies par les autres systèmes sensoriels. En effet l'audition, le toucher, l'odorat, le sens des masses ou le sens kinesthésique peuvent jouer un rôle important lors d'une tâche de navigation.

- Le sens **auditif** est probablement le plus important pour la plupart des déficients visuels. En effet lors d'un déplacement, les déficients visuels utilisent largement leur audition pour recueillir des indices sur leur environnement. Le sens des routes, l'alignement par rapport aux trottoirs ou même la traversée d'une route sont des indices qu'il est nécessaire de percevoir pour se déplacer dans la ville.
- Le sens **des masses** ou écholocation est une perception principalement 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 le non-voyant de naissance. Il peut être développé chez le non-voyant tardif. 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). 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 le sens kinesthésique qui permet de marcher en ligne droite avec un minimum de déviation en l'absence d'autres repères extérieurs. Ce sens est généralement méconnu par les voyants car les gestes d'un voyant sont généralement guidés par la vision et non par d'autres sens.

- 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 reconstituer la connaissance d'un tout. Le toucher avec la canne donne des précisions sur le sol, permet de prendre des repères, situer une bordure de trottoir, etc.
- **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 de leur provenance.

Il est évident, que l'utilisation efficace de toutes ces capacités permet aux déficients visuels d'améliorer leur mobilité ou navigation fine. Par contre, cela ne permet pas d'avoir des informations sur les directions à prendre, les noms des rues, leur position précise ou même leur propre orientation. En effet, la navigation globale ou l'orientation dans des environnements inconnus reste impossible sans une aide extérieure. Dans la section suivante nous allons présenter d'une façon non exhaustive quelques systèmes qui ont été proposés dans la littérature afin d'assister les déficients visuels dans la navigation fine.

1.4.2 Les dispositifs d'aides à la mobilité

la canne blanche et le chien restent les 2 outils d'assistance les plus employés par les déficients visuels. Cependant, plusieurs équipes de recherches tentent de proposer des aides électronique pour augmenter la canne. Ces systèmes ont vu le jour dans les années 1960 et permettent de détecter les obstacles dans l'espace péri-personnel en émettant des ondes électromagnétiques ou acoustiques [Villanueva 2011], [Farcy *et al.* 2006] ou en utilisant des capteurs embarqués tel que des caméras [Ju *et al.* 2009], [Johnson & Higgins 2006]. La restitution de l'information vers l'utilisateur se fait sous forme sonore ou vibratoire. Les ETAs fournissent à l'utilisateur une information sur la configuration des obstacles proches. Cette catégorie de systèmes est dédiée à la navigation fine. En 1986 le National Research Council des Etats-Unis a publié des recommandations [Working Groupe on Mobility Aids for the Visually Impaired 1986], pour aider les concepteurs des ETAs à développer des outils efficaces. Ainsi les informations que devrait fournir un dispositif électronique d'aide à la mobilité sont :

- 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.
- Le chemin ou la surface sur laquelle le piéton marche : texture, gradients, marches montantes et descendantes, bordures à gauche et à droite.
- La position et de la nature des objets à côté du chemin : bordures, barrières, passage de portes, arbres, etc.

Il est évident que la canne longue et le chien guide sont les aides à la mobilité les plus utilisés par les DV. Les ETAs viennent généralement augmenter la canne pour agrandir son champ de balayage (en longueur ou en hauteur) ou pour ajouter d'autre type de feedbacks (tactiles ou sonores). D'ailleurs une grande partie de ces appareils se fixe directement sur la canne, en tant que complément de détection. Une liste de ces produits et une comparaison de leurs fonctionnalités sont disponibles en grande partie dans une revue de la littérature

par Roentgen et al. [Roentgen *et al.* 2008].

Parmi les ETAs, nous pouvons citer le Tom Pouce (voir figure 1.10) [Farcy *et al.* 2006] développé par René Farcy (laboratoire Aimé Cotton) qui utilise des faisceaux infrarouges. Il permet, grâce à un système d'émission-réception des rayons, de signaler par une vibration la présence d'un obstacle avec environ 20% d'erreur sur la distance. L'appareil est fixé sur la canne longue et présente une résolution angulaire horizontale de 20° (correspondant à la largeur des épaules) et verticale de 50° (pour protéger des genoux à la tête). Il est réglable pour permettre de détecter préférentiellement les obstacles se situant à 50cm, 1,5m ou 3m. Etant basé sur la réflexion lumineuse, les limites de cet appareil sont une détection tardive des petits objets peu réfléchissants et une détection précoce des panneaux de signalisation réfléchissants ou des catadioptrés. Le Télétact (figure 1.11) utilise des faisceaux lasers pour



FIGURE 1.10 – le système Tom pouce.

détecter les obstacles. Il est capable de fournir la distance à un obstacle avec 1% d'erreur dans une zone allant de 10cm à 10m de l'utilisateur. La distance est codée soit en vibrations plus ou moins intenses, soit en une mélodie dont la hauteur et le rythme sont fonction de la distance. La principale limitation de ce système réside dans la difficulté d'utilisation, car la détection des obstacles nécessite un balayage manuel de l'environnement.



FIGURE 1.11 – Le système Teletact.

En 2006 [Johnson & Higgins 2006] présentent le TVS (Tactile Vision System), un dispositif de détection d'obstacles utilisant deux caméras attachées à la ceinture (Figure 1.12). Une carte de profondeur est créée en utilisant les images des deux caméras. La vidéo est capturée et analysée avec une cadence de 10 images/s. Les principaux avantages du TVS sont qu'il est attaché à la ceinture (les mains de l'utilisateur restent libres), il n'occulte pas l'audition et fonctionne en temps réel. La restitution de l'information est réalisée par 14 vibreurs disposés de façon linéaire autour de la taille avec une correspondance entre la position de l'obstacle dans l'axe horizontal de l'image et le vibreur qui signale l'obstacle. Si l'obstacle est à gauche, c'est le vibreur à l'extrémité gauche qui vibre et ainsi de suite. L'intensité de la vibration varie selon la distance à l'obstacle. La vibration est faible si

l'obstacle est loin et forte s'il est près. Le traitement est réalisé sur un ordinateur embarqué par l'utilisateur dans un sac à dos. EYECane [Ju *et al.* 2009] est un système composé

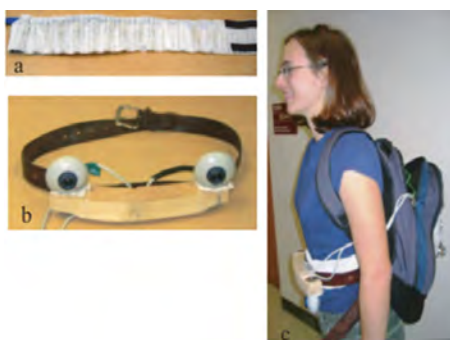


FIGURE 1.12 – Le système TVS. a. La ceinture avec vibreur. b. Les deux caméras montées sur la ceinture. c. Une utilisatrice équipée du système.

d'une webcam de résolution 320X240 fonctionnant à une fréquence de 30 Hz. La caméra est reliée à un ordinateur dans un sac à dos et montée sur la canne blanche. Une interface auditive a été développée pour restituer les informations à l'utilisateur (Figure 1.13). Au moyen d'un traitement du flux vidéo, le système est capable de détecter les obstacles sur l'itinéraire et avertit l'utilisateur.



FIGURE 1.13 – une utilisatrice avec le dispositif EYECane.

Il existe bien d'autres appareils de détection d'obstacles, fonctionnant sur le même principe (émission/réception d'ultrasons ou de signal lumineux et communication tactile ou sonore) mais, actuellement, aucun d'entre eux ne peut se substituer à la canne longue ou au chien. Dans cette thèse, nous traitons en particulier les problèmes liés à la navigation globale ou à l'orientation, c'est pour cette raison que je me limiterai à ces quelques exemples de dispositif d'aide à la mobilité.

Comme présenté auparavant, les systèmes d'aide à la mobilité ont été proposés pour essayer de résoudre les problèmes de la navigation fine. Cependant, ils n'ont aucun impact sur l'orientation de l'utilisateur étant donné qu'il n'embarquent pas de cartes permettant une vue d'ensemble de l'environnement ou de boussoles capables de déterminer l'orientation de l'utilisateur.

1.5 Conclusion

Le problème de l'autonomie des déficients visuels dans leurs déplacements est un problème crucial. Ce manque d'autonomie constitue un frein à leurs vies professionnelle et personnelle, avec des répercussions sur l'éducation, la culture, la vie associative, etc. Depuis des décennies, les recherches sur le handicap visuel ont fait émerger de nombreux dispositifs pour rendre plus accessibles l'information écrite, l'informatique, les déplacements et tout ce qui a trait aux fonctions assurées en temps normal par le système visuel. Certaines aides comme la canne longue ou le chien-guide sont devenues des standards. Dans ce premier chapitre nous avons présenté les problèmes que rencontrent quotidiennement les personnes avec des déficiences visuelles. En effet l'accès à l'information est une difficulté quotidienne que les lecteurs d'écrans, les afficheurs braille ou la synthèse vocale permettent à présent de minimiser.

La substitution sensorielle est une approche permettant la perception de l'environnement avec une modalité sensorielle (sonore, tactile, olfactive, kinesthésique) autre que la vision. Les informations sont captées, traitées puis restituées à l'utilisateur. Dans la littérature les systèmes basés sur une approche de restitution holistiques cherchent à restaurer une perception globale de l'environnement. Cette approche a montré ses limites. En parallèle, l'approche par localisation d'objets commence à émerger avec les nouvelles possibilités offertes par la vision artificielle et représente une alternative de plus en plus crédible pour restaurer des comportements visuo-moteurs précis.

Pour pallier au problème de la navigation, de nombreux systèmes ont été proposés. Parmi ces systèmes électroniques figurent les systèmes d'aide à la mobilité (ETA). Cette catégorie a été présentée comme une solution au problème de la navigation fine. Cependant, un ETA n'est pas encore à même de remplacer la canne ou le chien, mais comme nous l'avons vu, peut venir les compléter [Farcy *et al.* 2006]. Quoi qu'il en soit, les systèmes développés actuellement doivent prendre en compte le fait qu'une des mains de l'utilisateur est occupée par la canne longue ou le chien et doivent donc limiter l'utilisation de commandes manuelles au strict minimum afin de pouvoir conserver une main libre. En plus des ultrasons et des faisceaux lumineux, il devrait bientôt être possible d'exploiter la technologie de caméras à reconnaissance d'objets pour détecter la présence d'un élément inattendu sur le trajet (qui permettrait d'identifier les objets en plus de les détecter) ou encore aider à la navigation en environnement intérieur, en spécifiant à l'utilisateur l'emplacement d'éléments remarquables comme les fenêtres et les portes par exemple.

Bien qu'efficaces pour permettre aux déficients visuels d'éviter les obstacles, les ETA restent peu efficaces et peu utilisées et surtout, ne permettent pas une aide à la navigation globale. Les systèmes d'aide à l'orientation ou EOA, se présentent comme une solution potentiellement intéressante à ce type de problème. Dans le chapitre suivant nous allons présenter un état de l'art des systèmes d'aide à l'orientation pour les DV. Nous présenterons l'intérêt de tels dispositifs dans un processus de navigation globale en détaillant leur fonctionnement, leur utilisation et nous identifierons leurs faiblesses en vue de présenter nos contributions.

Dispositifs électroniques d'aide à la navigation pour DV : Etat de l'art

Sommaire

2.1	Les projets de recherche	24
2.1.1	Le Personal Guidance System	24
2.1.2	Le système MoBIC	27
2.1.3	Le système Drishti	27
2.1.4	Le système SWAN	28
2.1.5	Les systèmes avec un opérateur humain	29
2.1.6	Discussion	31
2.2	Les systèmes commercialisés	33
2.2.1	Le Trekker et Trekker Breeze	34
2.2.2	Le système brailleNote	35
2.2.3	Le Kapten	35
2.2.4	Discussion	36
2.3	Localisation et le positionnement pédestre	39
2.3.1	Le système GPS	39
2.3.2	L'équipement de l'environnement	42
2.3.3	La vision artificielle	43
2.3.4	Les centrales inertielles	45
2.3.5	Discussion	45
2.4	Système d'Information Géographique	47
2.4.1	La base de données	48
2.4.2	Les outils d'extraction d'information	50
2.4.3	Discussion	52
2.5	Des interactions non visuelles, en mobilité	53
2.5.1	L'interaction en entrée	53
2.5.2	L'interaction en sortie	54
2.6	Discussion	56
2.6.1	Conclusion	57

Dans ce chapitre, nous passons en revue dans un premier temps les principaux projets et systèmes d'aide à la navigation pour les DV. Nous choisissons de faire la séparation entre les projets de recherche et les produits commercialisés. Dans un deuxième temps nous présentons en détails les composants de ces systèmes. Nous concluons chaque section par une discussion qui nous permettra de positionner nos contributions par rapport à l'existant.

2.1 Les projets de recherche

Comme vu dans le chapitre précédent, en l'absence de la vision, la navigation devient une activité particulièrement complexe qui fait intervenir plusieurs sens (kinesthésie, ouïe, odorat, etc.). Pour assister les DVs dans cette activité, plusieurs projets de systèmes d'aide à la navigation ont été menés. Ces systèmes ont pour objectif de répondre aux problèmes de la navigation globale [Adams 1997]. Ils doivent donc connaître les différentes étapes que doit suivre l'utilisateur pour atteindre en toute sécurité sa destination (calcul d'itinéraire), déterminer la position de l'utilisateur sur une carte géographique (positionnement), connaître sa position par rapport au trajet prévu (suivi) et enfin le guider jusqu'à sa destination (le guidage). Dans la section suivante, nous allons présenter d'une façon non exhaustive les principaux projets de recherche.

2.1.1 Le Personal Guidance System

Les équipes de Jack Loomis (psychologie de la perception et de la cognition spatiale) et Reginald Golledge (géographie comportementale) de l'université de Californie à Santa Barbara furent les premières à mener une recherche complète de 1985 à 2008, ayant abordé l'ensemble des problématiques associées. Un premier prototype du dispositif d'aide à la navigation, dénommé Personal Guidance System (PGS) a été proposé au début des années 1990 [Golledge *et al.* 1991], [Loomis *et al.* 1994]. Le système comprend un récepteur GPS permettant de recevoir les signaux satellites, un ordinateur porté sur le dos contenant un système d'information géographique pour situer l'utilisateur dans l'espace (GIS, Geographic Information System) ainsi qu'un capteur d'orientation (boussole) permettant de connaître à tout moment la direction dans laquelle l'utilisateur se dirige.

Selon l'architecture proposée (figure 2.1), le système PGS est constitué de 3 composants principaux interconnectés entre eux.

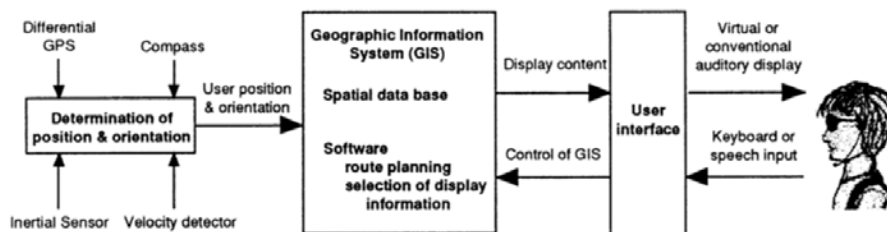


FIGURE 2.1 – Les différents composants du système PGS [Loomis *et al.* 1994].

Le premier composant assure la localisation de l'utilisateur ainsi que son orientation. PGS se base sur le GPS différentiel (D-GPS) ainsi qu'une centrale inertielle et un compas magnétique pour estimer en continu la position et l'orientation de l'utilisateur. Le troisième et dernier composant est l'interface qui doit être adaptée à un utilisateur déficient visuel. La figure 2.2 représente un utilisateur testant le système PGS.

Le deuxième composant est le SIG (Système d'Information Géographique) constitué d'une base de données spatiales qui décrit d'une manière détaillée l'environnement, ainsi qu'un ensemble d'outils analytiques pour calculer un itinéraire et extraire les informations à présenter à l'utilisateur. Le calcul d'itinéraire est réalisé au moyen d'un algorithme qui détermine le plus court chemin entre deux points. L'extraction d'informations environnementales se fait par tampon *buffer* de forme carrée et de 30 mètres de côté. Un nouveau tampon est chargé 7 mètres avant que l'utilisateur ne quitte l'ancien. Pour assurer le suivi



FIGURE 2.2 – le système PGS en action dans le campus de l’université de Californie.

de l’utilisateur lors de la réalisation de la tâche de navigation, le PGS est doté d’un couloir virtuel d’une largeur de 3 mètres sur chaque section droite. En cas de déviation (sortie de couloir) un message sonore d’avertissement est joué et le système guide l’utilisateur vers le couloir et non plus vers la destination finale.

L’équipe de Loomis s’est beaucoup intéressée au guidage. Ils ont notamment effectué de nombreuses études afin d’évaluer l’efficacité d’un système de guidage avec des sons virtuels (méthode binaurale). Grâce à un système d’écoute binaurale, il est possible de faire percevoir des sons spatialisés dans un casque stéréo, comme s’ils provenaient d’un endroit précis de l’espace. L’idée est que ce type de guidage spatialisé est un signal perceptif direct qui ne nécessite pas de traitement cognitif supplémentaire contrairement aux signaux de parole. En 1998, [Loomis *et al.* 1998] présentent une comparaison du mode de guidage binaural avec trois autres modes de guidage plus classiques, basés sur la parole. Dans le mode de guidage binaural, l’orientation de la tête de l’utilisateur est mesurée avec une boussole. Il est alors possible de lui faire entendre un son provenant du point de réorientation vers lequel il doit se diriger. L’intensité du son augmente au fur et à mesure qu’il s’en approche. Quand l’utilisateur rentre dans un cercle virtuel d’1,5m de rayon autour du point de réorientation, il entend un son virtuel provenant du point de réorientation suivant. Dans le mode « gauche/droite », la boussole est fixée sur le torse de l’utilisateur et permet de corriger la trajectoire empruntée en envoyant des signaux verbaux par l’intermédiaire du casque (« gauche », « droite » ou « tout droit »). Le mode « degré » est le même que le précédent avec une information verbale supplémentaire, concernant l’angle de rotation à effectuer par l’utilisateur pour faire face au prochain point de réorientation («gauche 80°»). Enfin, le mode « sans boussole » est le même que le mode « degré » sauf que l’information concernant la direction à emprunter par l’utilisateur n’est plus issue des données de la boussole mais de l’extrapolation de deux points de relevé de position successives par le GPS (ce qui implique que si l’utilisateur arrête de bouger, le système n’est plus capable d’envoyer les informations). La figure 2.3 présente les 4 configurations testées.

Les résultats sur les temps de parcours indiquent que le meilleur mode de guidage parmi ceux testés ici est le mode « virtuel » (sons binauraux), qui donne un temps de parcours

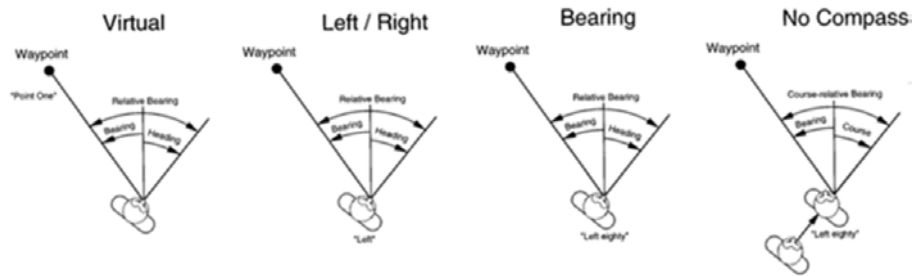


FIGURE 2.3 – les 4 configurations testées. La configuration « Virtual » se base sur des sons virtuels provenant du point à atteindre. Les trois autres stratégies utilisent des instructions textuelles. La stratégie « Gauche/droite » rajoute une indication « gauche » ou « droite » selon la trajectoire empruntée, pour la troisième configuration, l'angle est donné à l'utilisateur. La quatrième configuration est similaire à la troisième sauf que la valeur de l'angle provient de l'estimation GPS et non pas d'une boussole.

inférieur aux trois autres. De plus il est celui que les utilisateurs plébiscitent puisque c'est celui qu'ils préféreraient utiliser. Le mode de guidage donnant lieu aux temps de parcours les plus longs et aux moins bons jugements subjectifs est le mode « sans boussole ». Cette expérimentation souligne la nécessité d'utiliser une boussole pour garder l'information concernant la direction à emprunter par l'utilisateur ainsi que l'intérêt que peuvent avoir les sons virtuels pour le guidage du piéton. Une autre interaction pour le guidage, appelée



FIGURE 2.4 – Evaluation de l'interface HPI dans le dispositif PGS.

Haptic Pointer Interface (HPI) a été évaluée par [Marston *et al.* 2006] (cf. figure 2.4). L'idée est d'évaluer le gain que pourra engendrer l'utilisation d'une interface haptique. L'utilisateur possède dans la main une boîte reliée à une boussole électronique, quand la main pointe dans un angle de moins de 10° autour du prochain point de réorientation, l'ordinateur émet un signal auditif, via un haut-parleur fixé sur le torse. Le système HPI donne des indications verbales (« tout droit » quand la main pointe dans la bonne direction, « gauche » ou « droite » quand la main s'écarte de plus de 10° de la direction du point d'orientation. La distance au prochain point de réorientation est annoncée verbalement toutes les 8 secondes pour tous les systèmes, sauf le mode « parole virtuelle » qui donne cette information continuellement. L'utilisateur se déplace vers l'emplacement désiré en alignant son corps avec sa main.

2.1.2 Le système MoBIC

Le projet MOBIC [Petrie *et al.* 1996] est un projet ayant reçu le soutien de la commission européenne (1994-1996). Le Système MoBIC est constitué de deux composants : MoPS (MoBIC Pre-journey System) : c'est un logiciel grâce auquel l'utilisateur prépare son trajet en le découvrant en amont sur son PC (avant de sortir de chez lui). Le deuxième composant, MoODS (MoBIC OutDoor System) est la partie du système que l'utilisateur devra embarquer avec lui lors de ses déplacements. Comme le PGS, le système MoBIC est basé sur les trois composants principaux à savoir un système de positionnement, un SIG et une interaction non visuelle. MoBIC est basé uniquement sur le système GPS pour estimer la position de son utilisateur. Les premières évaluations décrites dans [Strothotte *et al.* 1996] montrent qu'il est difficile de guider un piéton non voyant avec une erreur de positionnement aléatoire qui dépasse les 20 mètres. Le manque d'informations géographiques constatées dans les cartes (absence de trottoirs, absence de chemins pour les piétons, etc.) ainsi que la faible précision des données existantes (éléments mal positionnés, erreurs de dimensions pour les bâtiments) ont conduit les chercheurs travaillant sur le projet MoBIC à proposer des recommandations sur l'élaboration de cartes géographiques mieux adaptées à un déplacement piéton. Parmi ces recommandations, l'utilisation de plusieurs sources de données afin de collecter et croiser le plus d'informations possibles sur l'environnement.

Pour définir les itinéraires les mieux adaptés, les chercheurs ont proposé 3 niveaux de présentation de l'information dans le SIG : le premier est le niveau « essentiel » regroupant les données géographiques facilement disponibles comme les noms des rues, les informations sur les distances entre les bâtiments, les obstacles connus comme les cabines téléphoniques ou les abribus. Le deuxième niveau appelé « désirable » contient plus de détails sur les boutiques, les bâtiments publics, les types de croisements et les transports publics. Le troisième niveau, baptisé « idéal », est celui dans lequel les informations sur les obstacles ponctuels (les travaux par exemple) doivent être mises à jour quotidiennement.

2.1.3 Le système Drishti

Drishti (Figure 2.5 présenté pour la première fois en 2001 par l'équipe de Sumi Helal à l'université de Floride [Helal *et al.* 2001] est un système qui offre une assistance à la fois à l'intérieur des bâtiments (où les systèmes de géo-positionnement classiques sont inopérants) et à l'extérieur. Au travers d'une interface adaptée, le système Drishti assure l'augmentation de l'environnement de son utilisateur en fournissant une description détaillée de l'environnement proche. Cette description est extraite à partir d'un SIG. Le système est composé d'un ordinateur portable embarqué dans un sac à dos et d'un récepteur GPS différentiel avec une erreur moyenne de 50 cm dans des conditions météorologiques favorables.

Dans sa première version, Drishti embarque une carte du campus de l'université de Floride fournie par le département de géographie de l'université. Afin d'éviter les voies pour véhicules, la base de données géographique utilisée dans le SIG a été nettoyée pour ne conserver que les chemins qui peuvent être empruntés par les piétons. Cela permet l'appariement (map-matching) précis de la position absolue renvoyée par le système de positionnement avec les informations issues de la carte (trottoirs et passages piétons par exemple). Cela permet aussi de calculer des itinéraires empruntant les chemins piétons. Un algorithme du plus court chemin a été implémenté dans le système. Les utilisateurs de Drishti avaient la possibilité de rajouter ou de supprimer des données géographiques (obstacles par exemple) en effectuant des requêtes. Ces requêtes, implémentées dans une API java, sont activées par commande vocale. Cela permet de personnaliser la base de

données selon les préférences de chaque utilisateur. L'interaction avec l'utilisateur se fait avec un moteur TTS. Comme dans le PGS, le guidage est assuré par des sons virtuels en 3D. Malheureusement, les auteurs ne présentent pas d'évaluation de leur système et se limitent à la présentation et à la description de l'architecture adoptée.

La deuxième version de Drishti a été présentée en 2004 [Ran *et al.* 2004] et gère le déplacement à l'intérieur par le biais d'une localisation par ultrasons. La position de l'utilisateur est déterminée par triangulation grâce à des balises placées dans le plafond d'un appartement (4 balises) et des capteurs embarqués sur l'utilisateur (1 sur chaque épaule). Les résultats montrent que sur 22 tests, menés à différents endroits, l'erreur maximale mesurée a été de 22 cm avec 12 cas inférieurs à 10 cm par rapport à la position réelle. Cependant, pour obtenir une telle précision, une carte du bâtiment doit être disponible, ce qui n'est pas toujours possible.



FIGURE 2.5 – système Drishti dans le campus de l'université de Floride.

2.1.4 Le système SWAN

Le SWAN est un projet développé par le département de psychologie du Sonification Lab du Georgia Institute of Technology et porté par l'équipe de Bruce Walker. Ce système est basé sur la combinaison d'un GPS avec des capteurs inertiels, 2 caméras embarquées, boussoles, podomètres et autres capteurs, ce système vise à guider les non-voyants par synthèse binaurale. Dans ce projet, la sonification spatialisée est transmise via un casque stéréophonique à conduction osseuse. Ce système [Wilson *et al.* 2007] doit permettre à l'utilisateur de connaître sa position et son orientation, de trouver et suivre un chemin sécurisé pour piéton jusqu'à sa destination tout en étant conscient des principales éléments présents dans son environnement (Figure 2.6).

Le SWAN utilise une interface de présentation des messages basée uniquement sur l'audio. Les sons virtuels permettent de guider l'utilisateur tout au long de son trajet (en utilisant des sons appelés "balises sonores") et d'indiquer la position d'objets ou de bâtiments qui caractérisent l'environnement urbain. L'utilisateur est guidé par un son virtuel répétitif positionné en direction du prochain point de réorientation à atteindre mais à une distance fixe de l'utilisateur (afin de ne pas introduire d'atténuation du son). Lorsque l'utilisateur s'approche de la cible, la fréquence de répétition de la balise sonore s'accélère. Lorsque le point est atteint, un son indique le succès puis une nouvelle balise sonore est placée dans la direction du nouveau point à atteindre. Si l'utilisateur manque



FIGURE 2.6 – Le système SWAN [Wilson *et al.* 2007].

un point de passage, le son provient alors de l'arrière avec un changement de timbre permettant de lever les ambiguïtés avant/arrière.

La présentation des informations additionnelles (points d'intérêt, surfaces de transitions, arrêts de bus et autre caractéristiques de l'environnement) stockées dans le SIG est réalisée avec une combinaison de TTS et de sons spatialisés. Ces informations sur l'environnement sont présentées en même temps que la sonification de la trajectoire à suivre.

Les tests réalisés dans le cadre du projet SWAN, se sont plutôt concentrés sur une plate-forme virtuelle. Une étude expérimentale a été réalisée dans un simulateur virtuel du dispositif pour évaluer trois types d'effets : ceux dus aux types de sons utilisés pour le guidage (impulsion de type sonar, son pur ou bruit rose), ceux liés à la taille du cercle virtuel entourant les points de réorientation (0,5, 1,5 ou 15 mètres) et ceux liés à l'apprentissage (analyse de la progression suite à la réalisation du guidage sur trois chemins différents) [Walker & Lindsay 2006]. Pour cette étude, les sujets assis sur une chaise tournante se déplaçaient dans l'environnement virtuel à l'aide d'un joystick et se réorientaient avec la chaise. Les relevés de temps et de distance parcourue permettent de tirer un certain nombre de conclusions. Tout d'abord, cette étude confirme bien le fait qu'un guidage sonore virtuel est efficace pour la navigation, puisque tous les participants ont réussi à effectuer la totalité des trois chemins. Le cercle virtuel autour d'un point de réorientation ne doit pas dépasser 2 foulées humaines et par conséquent 1,5 mètres est la taille idéale. Cette valeur confirme aussi les recommandations faite par l'équipe de Loomis [Loomis *et al.* 1998].

2.1.5 Les systèmes avec un opérateur humain

Dans ce type de système, un opérateur humain peut intervenir à tout moment. Il s'agit, en général, d'un système identique à ceux décrits précédemment, mais avec en plus un module de contrôle installé sur un ordinateur distant. La liaison entre le dispositif embarqué et le module de contrôle est assurée par le réseau GSM ou 3G. La partie embarquée est totalement autonome est fait office de système d'aide à la navigation à part entière. En cas de besoin, l'utilisateur peut faire appel à un opérateur humain pour demander de l'aide (franchir une zone difficile, traverser un carrefour compliqué, etc.). Grâce au module de contrôle, l'opérateur peut suivre en temps réel l'utilisateur et lui donner des instructions [Hunaiti *et al.* 2006], [Bujacz & Baranski 2008]. Le système Naviton [Baranski *et al.* 2010], présenté sur la Figure 2.7, utilise une caméra placée autour du cou de l'utilisateur et fournit un flux vidéo qui peut être visualisé par l'opérateur. Ce dernier aura donc la possibilité de décrire l'environnement dans lequel évolue l'utilisateur. La

liaison se fait à travers une communication téléphonique, ce qui donne la possibilité à l'opérateur de demander à l'utilisateur d'effectuer des actions spécifiques comme l'orientation de la caméra vers un point particulier.



FIGURE 2.7 – Un utilisateur équipé avec le système Naviton.

Dans un premier temps [Baranski *et al.* 2009] ont présenté l'architecture globale du système (voir figure 2.8). Ils ont aussi présenté une première étude pour démontrer la faisabilité technique d'un tel système. Le flux vidéo est compressé et envoyé sur le réseau GSM en utilisant le protocole TCP/IP. Les échanges de voix et la position GPS sont transmis via des paquets UDP. En cas de coupure, la connexion peut être rétablie à la fois par l'utilisateur et l'opérateur à distance. Le SIG utilisé est celui de Google (Google Maps 2009). L'opérateur suit la position GPS de l'utilisateur désignée par un point et une flèche indiquant la direction. La couleur du point symbolise la précision du GPS (basée sur le HDOP interne du signal). Le vert symbolise une très bonne précision (3 mètres), le jaune une précision satisfaisante (environ 8 mètres) et le rouge une très mauvaise précision qui peut aller jusqu'à plusieurs dizaines de mètres.



FIGURE 2.8 – L'architecture du système Naviton, avec une partie embarquée par le Déficiant visuel et un module de contrôle géré par un opérateur.

Coté opérateur, et pour mieux se représenter l'environnement où l'utilisateur évolue, trois configurations existent : 1/ une carte simple avec les noms de rue et les contours des bâtiments, 2/ une image satellite ou 3/ une visualisation hybride incluant une image satellite avec les noms de rues superposés. Un premier test a été conduit pour évaluer ce système, la sécurité a été privilégiée et un utilisateur voyant a été choisi. Pour la précision

du GPS, les résultats constatés ne sont pas différents de ceux présentés avec les autres systèmes. L'erreur moyenne est supérieure à 10 mètres et les pertes de signal sont assez fréquentes. Les auteurs proposent donc d'ajouter une centrale inertielle pour améliorer le positionnement. Pour ce qui est de la résolution de la caméra et de la transmission du flux vidéo, la bande passante est suffisante pour avoir une bonne qualité de flux vidéo, mais la résolution de la caméra (320x240 pixels) et la largeur du champ sont assez faibles. L'idée proposée par les auteurs pour pallier ce problème serait donc une caméra avec une meilleure résolution ou l'adaptation des paramètres de la caméra en temps réel par l'opérateur.

2.1.6 Discussion

Nous avons présenté les principaux projets de recherche visant à concevoir des systèmes électroniques d'aide à la navigation pour les non voyants. Le Tableau 2.1 fait la synthèse des dispositifs présentés précédemment.

Ces différents dispositifs d'aide à la navigation ont été proposés depuis le début des années 1980. Il s'agit généralement de projet de recherche avec une composante fondamentale dont le but est de comprendre les besoins des déficients visuels et de produire de nombreuses connaissances importantes dans le domaine des aides au déplacement.

Comme présenté dans le tableau 2.1, 3 des dispositifs présentés utilisent le D-GPS comme principale source de positionnement. Ce choix est intéressant dans le cadre d'évaluations unitaires des autres fonctionnalités (comme le guidage ou l'interaction), cependant, il n'offre pas de solution applicable en réalité étant donné le coût du récepteur et du service qu'il va falloir acheter en plus pour pouvoir bénéficier des avantages du D-GPS. Néanmoins, l'utilisation du D-GPS dans les projets de recherches a permis d'évaluer plusieurs autres fonctionnalités comme le guidage ou le suivi et de mettre en évidence l'apport de tels dispositifs dans le cas où le positionnement est suffisamment précis.

Afin de guider leurs utilisateurs d'un point A vers un point B, les systèmes d'aide à la navigation utilisent des techniques de guidage qui consistent à indiquer les directions à suivre jusqu'à atteindre la destination. Pour pouvoir guider efficacement, le système doit pouvoir estimer avec précision la position de l'utilisateur par rapport à l'itinéraire. Généralement une stratégie de suivi d'itinéraire est nécessaire. Chaque point de réorientation (de l'itinéraire) est une étape intermédiaire que le déficient visuel doit valider. Si le point i est atteint, le point $i+1$ sera à son tour indiqué. La figure 2.9 représente un cercle virtuel à atteindre autour d'un point de réorientation. [Walker & Lindsay 2006] ont montré que lors d'une stratégie de suivi basée sur les points de réorientation, la taille du cercle autour du point d'orientation a une influence sur le temps et sur la distance parcourue. En effet, un cercle de taille moyenne (environ la taille d'une foulée humaine) est la solution la plus sûre (même si elle n'est pas celle qui mène aux meilleurs temps de parcours). En effet, il est facile de passer à côté du cercle s'il est trop petit, ce qui peut amener l'utilisateur à faire demi-tour et perdre ainsi du temps. Même si un grand cercle constitue un gain de temps car il s'avère plus facile à valider, le fait de changer de direction trop tôt peut amener, dans un contexte urbain, à marcher droit vers un mur ou à traverser une rue au mauvais endroit. En conclusion, il semble que les effets d'apprentissage et les effets de la taille du cercle utilisé pour le suivi d'itinéraire ont une grande influence sur le bon accomplissement de la tâche de navigation.

TABLE 2.1 – Les principaux projets de recherche pour la conception de système d'aide à la navigation destinés aux déficients visuels

	Année	Environnements		Universités	Positionnement	Suivi	SIG	Interaction	
		Outdoor	Indoor					Entrée	Sortie
PGS	1985	✓	✗	UCSB, USA	-D-GPS	Par points	Home-made	-Reco vocale -clavier	-sons virtuels -haptiqu/TTS
Mobic	1995	✓	✗	Royal National Institute for the Blind, England	-GPS	✗	✗	-Reco vocale -clavier	-TTS
Drishti	2001	✓	✓	Université de Floride, USA	-D-GPS -Ultrasons	Par points	Université de Floride	-Reco vocale	-sons 3D -TTS
SWAN	2002	✓	✗	Georgia Institute of Technology	-GPS	Par points	✗	-Reco vocale -vocal	-sons 3D -TTS
Naviton	2004	✓	✗	Université technique de Lodz, Pologne	-GPS	✗	Google map	-Reco vocale	-sons 3D -TTS Opérateur

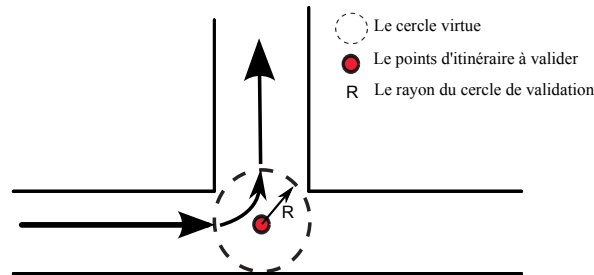


FIGURE 2.9 – Représentation d'un cercle virtuel autour d'un point de réorientation. Quand l'utilisateur atteint le cercle le point suivant est signalé.

Proposer d'autres stratégies de suivi, plus robustes et plus flexibles nous paraît très important en soi, mais aussi pour compenser la mauvaise précision du positionnement que l'on obtient avec des systèmes GPS classiques.

En plus d'un guidage adapté, le système d'aide à la navigation devrait offrir à son utilisateur une description spatiale précise de son environnement. En effet en embarquant une base de données géographique, et grâce à des outils d'extraction d'informations adaptées, les systèmes d'aide à la navigation peuvent donner des informations sur l'environnement, par exemple la disposition des différents bâtiments ou du mobilier urbain. Parmi les systèmes présentés précédemment bien peu se sont intéressés à cette fonction. Cela peut s'expliquer par le fait que les SIG utilisés ne sont pas assez complets, détaillés et adaptés à un déplacement piéton. En effet tous ces systèmes utilisent des SIG fournis par leur université ou des SIG commerciaux. De plus, il faudrait concevoir des interactions adaptées permettant de décrire l'environnement sans parasiter la tâche de guidage. Ceci représente de nouveaux défis de recherche.

Pour finir, l'évaluation de l'utilisabilité de tels systèmes dans une tâche de navigation globale reste parmi les priorités des chercheurs. Cependant, plusieurs difficultés sont à considérer parmi lesquelles la nécessité de la mise en place d'un plan expérimental qui doit prendre en compte des facteurs non contrôlés (précision et disponibilité du GPS). Ou encore la prise de risques physiques pour les utilisateurs. Les équipes de recherches se sont plutôt focalisées sur des tests unitaires visant à évaluer séparément le fonctionnement des composants utilisés (par exemple le guidage par synthèse binaurale). Un deuxième biais vient se rajouter lors de la sélection des sujets (utilisateurs). Ce sont la plupart du temps des sujets voyants ayant les yeux bandés. En effet ; les concepteurs font généralement appel à cette solution pour combler le manque de sujets disponibles. Selon [William Penrod *et al.* 2005], cela élimine les facteurs d'expérience et de compétences qu'un déficient visuel acquiert durant ses déplacements et sa formation en locomotion. Par contre, l'avantage d'une telle technique est de favoriser les aspects relatifs à la sécurité.

Il est important de rappeler que même si certains de ces projets n'ont pas abouti à la mise sur le marché d'un dispositif commercial, ils ont apporté de nombreuses connaissances importantes dans le domaine des technologies d'assistance et de l'interaction non-visuelle. D'autres projets ont été poursuivis par une commercialisation de systèmes d'aide au déplacement, principalement en adaptant des systèmes GPS grand public pour les rendre accessibles aux non-voyants.

2.2 Les systèmes commercialisés

En plus des projets de recherches présentés dans la section précédente, il existe sur le marché quelques systèmes commercialisés pour le guidage des déficients visuels. Ces

systèmes sont généralement une adaptation du système GPS pour véhicule avec quelques modifications en termes d'interaction (boutons et synthèse vocale au lieu d'écran tactiles). Dans la section suivante nous allons présenter quelques systèmes commercialisés.

2.2.1 Le Trekker et Trekker Breeze

Le Trekker, commercialisé par Humanware¹ est composé d'un PDA (Personnel Digital Assistant contenant les cartes géographiques), d'un logiciel à installer, d'un récepteur GPS sans fil, d'un haut-parleur externe et d'une ceinture pour y accrocher tous ces éléments (voir figure 2.10 à droite). Il permet de trouver la position courante et de chercher des rues et des points d'intérêt à mesure que l'on se déplace, et autorise aussi à choisir entre un mode piéton et un mode routier, ainsi qu'un mode "temps réel" ou un mode "à domicile". L'interaction en entrée se fait par l'intermédiaire de boutons; l'interaction en sortie est purement verbale, via le haut-parleur externe qui ne masque pas les sons de l'environnant (contrairement à un casque audio). Cependant, la grande variété de menus et d'options accessibles peuvent rendre fastidieuse la navigation dans les menus et le recours au Braille pour entrer les instructions n'est pas reconnu comme le moyen le plus pratique, ni le plus rapide. [Havik *et al.* 2010] ont mené une évaluation du Trekker avec 19 sujets sur 6 semaines. A l'issue de cette évaluation les problèmes fréquemment constatés peuvent se résumer dans l'incapacité à naviguer en milieu inconnu et Incapacité à atteindre des adresses précises. Les personnes participantes à cette évaluation reportent aussi un manque d'informations à propos des rues et de l'environnement ainsi qu'un sentiment d'insécurité.

Le Trekker Breeze, qui a succédé à la version précédente, est aussi compact qu'une télécommande de télévision et peut être manipulé d'une seule main. Parmi les nouvelles fonctionnalités intéressantes, il faut remarquer l'annonce vocale des noms de rues, des intersections ainsi que des points d'intérêts à mesure que l'utilisateur se déplace. Parmi les nouveaux points forts, une plus grande autonomie.



FIGURE 2.10 – A gauche le Trekker. A droite le Trekker Breeze.

Le Trekker embarque une carte géographique issue du commerce qui est prévu pour la navigation automobile et n'est donc à l'origine pas adaptée à la navigation piétonne : il n'y a pas d'indications concernant les trottoirs, les passages piétons ou des points de repère spécifiquement piétons. Plusieurs utilisateurs critiquent le manque de précision (problème de positionnement) et le prix assez élevé d'un tel dispositif (1000\$).

1. <http://www.humanware.com/>

2.2.2 Le système brailleNote

Le système BrailleNote GPS, commercialisé lui aussi par Humanware, est composé d'un assistant braille portable auquel on connecte un récepteur GPS (voir la figure 2.11). Le positionnement se base uniquement sur le système GPS. Plusieurs cartes des différentes régions des Etats-Unis sont fournies ainsi qu'une carte flash sur laquelle le logiciel est installé. Il permet à l'utilisateur de charger les cartes de son choix et créer, stocker et éventuellement effacer des trajets. Un système de stockage des points d'intérêt arrangés en catégories (hôtels, restaurants, hôpitaux, etc.) offre la possibilité d'utiliser ces points comme informations supplémentaires pendant la navigation ou de les entrer comme destination. Enfin, ces points d'intérêt et les noms des rues sont accessibles aussi bien pendant la navigation que lors de la préparation de l'itinéraire à domicile grâce à un mode "exploration".

Le guidage est assuré par des messages textuels. Il est possible de choisir le type de l'énoncé des différentes directions entre le cadran horaire ou des directions plus classiques gauche/droite ou encore de choisir entre une présentation détaillée de tous les croisements jalonnant un parcours défini ou une présentation plus restreinte des seuls virages à emprunter. Dans une évaluation menée avec ce système, [Denham *et al.* 2004] portent une grande variabilité dans la précision. Cette variabilité s'explique par la mauvaise précision de positionnement ainsi que l'absence de données géographiques importantes pour un non voyant.



FIGURE 2.11 – Le système brailleNoteGPS

2.2.3 Le Kaptan

Le Kaptan est un système de guidage par GPS, initialement dédié aux randonneurs ou aux cyclistes, que les déficients visuels ont adopté car il ne possède pas d'écran. Le Kaptan fonctionne suivant 4 modes de navigation. Le mode piéton, vélo, moto ou voiture. Il embarque un moteur de reconnaissance vocale performant fourni par Nuance et implémenté sur un cœur Linux. Comme modalité de sortie, le Kaptan est muni d'un moteur de synthèse vocale pour annoncer les instructions. Le Kaptan permet d'avoir la liste des points d'intérêt autour d'une position donnée. Il permet à son utilisateur de préparer un parcours

et d'écouter toutes les instructions de navigation avant de partir. Il permet aussi de jouer un itinéraire en sens inverse. Une fonction K-TAG permet à l'utilisateur d'enregistrer la position des adresses les plus utiles ou préférées et de les utiliser comme adresses de destination ou points de repère. Le Kaptén permet aussi de décrire les croisements et d'indiquer les noms des rues traversées. Cependant, cette fonction reste limitée par les informations disponibles dans la carte et qui sont plutôt destinées à une navigation automobile.

Vu l'engouement qui a suivi le lancement du Kaptén auprès des déficients visuels dans sa première version, le fabricant du Kaptén, Kapsis, a lancé une deuxième version du Kaptén appelé Kaptén plus et dédiée cette fois-ci aux déficients visuels en rajoutant un cache en plastique permettant de faciliter la reconnaissance tactile des boutons (Figure 2.12).



FIGURE 2.12 – À gauche le Kaptén, à droite le cache pour le Kaptén plus.

2.2.4 Discussion

Dans la section précédente, nous avons présenté quelques systèmes commercialisés d'aide à la navigation pour déficient visuel. Le Tableau 2.2 présente une synthèse des principaux systèmes existants sur le marché.

Deux types d'implémentations existent, sur des appareils dédiés (BrailleNote, Trekker) ou pour plus de flexibilité des solutions logicielles sur téléphone portable (wayfinder, Mobile Geo). La plupart sont très chers (1000-2000€) sauf le kaptén et le wayfinder (200-270€). Tous ont la même précision limitée du GPS et ont des modes de guidages assez semblables. Pour la plupart de ces systèmes, les cartes utilisées reprennent simplement celles utilisées dans les GPS pour voiture. Ces différents systèmes n'ont pas trouvé le succès escompté auprès des non voyants. C'est pour cette raison que plusieurs ne sont plus commercialisés aujourd'hui (Trekker depuis 2004, Wayfinder depuis 2009 ou le mobieGéo depuis 2010).

Il est évident que ces systèmes ne sont pas parfaitement utilisables par des piétons déficients visuels qui ont besoin d'une information d'orientation très précise. Si la plupart des constructeurs revendiquent des précisions de l'ordre de 5 mètres 95% du temps, les canyons urbains se révèlent être un verrou technologique important avec des précisions inférieures à 50 m dans certains cas. Il faut aussi noter que le recours au map-matching, n'est pas possible dans le cas d'un piéton puisque celui-ci peut se trouver à n'importe quel endroit de la rue, contrairement aux voitures où on fait l'hypothèse qu'elles se déplacent toujours sur la route. On pourrait à la rigueur supposer que l'utilisateur se trouve sur un trottoir, mais les trottoirs ne figurent pas dans les bases de données cartographiques commerciales ; seules les rues sont mentionnées. Avec une telle imprécision, le piéton déficient visuel peut facilement se retrouver dans une autre rue ou à un carrefour adjacent à celui qui est indiqué. Cette situation n'est pas trop gênante pour un utilisateur voyant puisqu'il

peut vérifier sa position sur les plaques de rue par exemple, mais elle génère beaucoup de stress chez les déficients visuels et peut les mettre en situation de danger.

De plus, aucun de ces systèmes ne permet de calculer un itinéraire pour piéton en prenant en compte les spécificités d'un déplacement piéton (trottoirs, passages piétons, chemins pour piétons) ou les spécificités des déficients visuels afin d'éviter les points difficiles (places ouvertes, terrasses de cafés, etc.). Ces lacunes sont dues à deux problèmes principaux : l'absence de bases de données cartographiques pour piéton et l'imprécision des systèmes de géolocalisation actuels.

Tous ces systèmes partagent le même principe de suivi d'itinéraire basé sur la validation successive des points de l'itinéraire. La qualité du guidage proposé par ces systèmes est fortement liée à la robustesse du suivi. En effet, si l'utilisateur (le positionnement) rate un point d'itinéraire (cercle virtuel) le système continuera à indiquer le même point ce qui induit à une erreur dans le guidage. Idem, si le point est validé trop tôt, le système va proposer de fausses instructions. La faible précision du positionnement rend donc le suivi et par conséquent le guidage imprécis. C'est pour toutes ces raisons que ces systèmes n'ont pas réussi à s'imposer comme des outils d'aide au déplacement incontournables et qu'ils n'ont pas convaincu les utilisateurs. Il apparaît donc que les verrous clés dans l'assistance à la navigation pour les déficients visuels se situent au niveau du positionnement (précision et suivi) et du guidage (itinéraires et interaction). Nous allons maintenant présenter en détails les différentes techniques de positionnement ainsi que les SIGs généralement utilisés dans les EOAs. L'interaction sera présentée brièvement ici. Nous mentionnons cependant qu'elle a fait l'objet d'une thèse dans le cadre du projet NAVIG [Parseihian 2012].

TABLE 2.2 – Récapitulatif des principaux systèmes d'aide à la navigation commercialisés.

	Année	Prix	Solution		Suivi	Interface d'interaction	
			Matérielle	Logicielle		Entrée	Sortie
Kapten	2008	200	✓	✓	Par points	-Bouton -Reco-Vocal	TTS
Trekker	2002	1600	✓	-	Par points	-Bouton	TTS
Breeze	2009	800	✓	-	Par points	-Bouton	TTS
BrailleNote	2002	1700	✓	-	Par points	-Braille	Braille /TTS
Wayfinder	2003	270	-	✓	Par points	-Bouton	TTS
MobileGéo	2008	1000	-	✓	Par points	-Bouton	TTS
Street talk VIP	-	1200	✓	-	Par points	-clavier	TTS
Angéo	2012	1850	✓	-	Par points	-Bouton	TTS Opé- rateur

2.3 Localisation et le positionnement pédestre

Dans la navigation automobile, l'utilisation de la localisation est assez répandue avec la démocratisation des systèmes de guidage par satellites. En effet en couplant une position absolue avec une carte géographique, on est capable de connaître la position sur la surface de la terre d'un point à une fréquence assez élevée (1Hz). Le couplage localisation/cartographie est extrêmement intéressant dans le domaine de la navigation. Cependant, l'assistance à la navigation pédestre implique quelques défis supplémentaires par rapport à la navigation d'un robot ou d'une voiture. Les différences peuvent être résumées dans les points suivants :

- Les robots peuvent être entièrement contrôlés. Ce n'est pas le cas des piétons à qui on peut proposer des itinéraires ou donner des instructions mais sans les obliger à les suivre.
- En robotique on connaît a priori toutes les actions et tous les comportements puisqu'elles ont été programmées. On peut aussi mesurer et comparer les erreurs éventuelles grâce aux capteurs embarqués, ce qui n'est pas toujours possible avec un humain.
- Le mouvement humain est assez imprédictible et difficile à modéliser, que ce soit pour un individu donné ou une population dans son ensemble.

En parallèle aux, deux mécanismes naturels permettent de conserver une idée plus ou moins précise de sa position et de son orientation au cours d'un déplacement :

- La prise de points de repères : en anglais **Landmark based navigation**, qui consiste à utiliser les repères environnants pour se positionner. En effet nous pouvons nous positionner d'une façon relative à un objet connu sans pour autant avoir besoin d'autres informations.
- L'intégration des déplacements dans le temps : En anglais **Path intégration**. Il s'agit d'une intégration sensori-motrice de tous les déplacements au cours du temps pour faire une estimation de son déplacement depuis son point de départ à chaque pas de temps.

Ces deux mécanismes ont été largement étudiés dans plusieurs domaines comme la navigation humaine [Klatzky, Roberta L. *et al.* 1999] [Wan *et al.* 2012] ou la navigation animale [Etienne *et al.* 1996]. Dans ce qui suit nous allons présenter les différentes techniques de positionnement utilisées dans les systèmes électroniques d'aide à navigation.

2.3.1 Le système GPS

En 1968, le département de la Défense des États-Unis imagine un système de localisation géographique composé d'une constellation de satellites en orbite autour de la Terre qui pourrait fournir en temps réel la position d'un mobile n'importe où sur la planète et à tout moment. Le système NAV.S.T.A.R-G.P.S (NAVigation System Time And Ranging - Global Positioning System) a alors été conçu, financé et développé dès 1973 pour un usage strictement militaire. Le premier satellite a été lancé en 1978.

Le système a été déclaré opérationnel en 1994, comportant alors 28 satellites répartis sur 3 plans orbitaux quasi-circulaires autour de la Terre et formant un angle de 55° avec l'équateur à une altitude de 20200 km. Le système est également composé d'un réseau de station au sol pour le contrôle des satellites. Depuis 1995, la constellation comporte 24 satellites opérationnels et 4 satellites de réserve en cas de dysfonctionnement. Tous les satellites sont opérationnels et les performances du système sont stables.

Dans plusieurs domaines de navigation (aéronautique, maritime, automobile), les performances offertes par le GPS sont satisfaisantes et le système est utilisable sans beaucoup

de modifications si ce n'est quelques filtrages pour améliorer la qualité du signal.

Dans le contexte de la navigation piétonne (en milieu urbain avec des vitesses de déplacements assez faibles et des changements d'orientation plus fréquents), les signaux sont fortement perturbés par des problèmes de réflexion, voir partiellement occultés dans des canyons urbains, ce qui diminue fortement la précision. Les sources d'erreurs les mieux identifiées sont :

- Estimation temps réception qui provient de l'estimation précise du temps de réception du signal.
- Effet de la position des satellites : la différence de position d'un satellite par rapport à son orbite théorique.
- Effet de l'imprécision des horloges : les horloges atomiques des satellites sont très précises mais néanmoins sujettes à des dérives.
- Effet de la réflexion des signaux : dans les villes par exemple, la réflexion sur les bâtiments fait que le signal arrive au récepteur avec un temps de retard ou à plusieurs reprises (multi-trajets).
- Effet dues à l'atmosphère : la vitesse de transmission des ondes radios subi des variations imprédictibles, en particulier dans l'ionosphère et la troposphère.
- Effet des imprécisions de calcul : pour des raisons de ressources calculatoires, les nombres sont arrondis lors des calculs de positionnement.

Le tableau 2.3 représente les valeurs d'erreurs respectives à chaque source possible :

TABLE 2.3 – Sources d'erreurs du GPS et les erreurs respectives à chaque source

Causes	Erreur estimée (m)
Estimation temps réception	$\pm 0,3$
Erreur de positionnement	2,5
Imprécision d'horloge	± 2
Effet de la réflexion des signaux	$\pm 1-60$
Effet atmosphériques	$\pm 0,5$
Arrondis de calcul	± 1

Cependant, la répartition dans le ciel des satellites visibles est un facteur qui peut rajouter de l'imprécision. La meilleure configuration est que les satellites émetteurs soient les plus éparpillés possibles dans le ciel et non situés à des positions assez proches. La valeur de la dilution de la précision horizontale (HDOP) ainsi que la précision géométrique (GDOP) déterminent la qualité de la configuration des satellites visibles à un instant donné.

2.3.1.1 Le GPS différentielle : D-GPS

Le GPS différentiel, ou D-GPS, a été proposé afin d'améliorer la précision de positionnement du système GPS. Basé sur un réseau de stations de référence fixes qui transmettent l'écart entre la position calculée à partir du signal des satellites et leurs positions réelle qui est connue avec précision. Ces réseaux de balises sont implantés par des agences gouvernementales ou des sociétés privées qui mettent à disposition ces corrections aux utilisateurs

intéressés via un abonnement. Le D-GPS offre une précision métrique. Cette technologie est très utilisée en navigation aussi bien terrestre (dans le domaine agricole) que maritime. La portée des bases de référence peut atteindre 300 km, pourvoyant ainsi aux besoins de positionnement précis pour la navigation côtière. En ce qui concerne les EOAs, PGS [Loomis *et al.* 1994] et Drishti [Helal *et al.* 2001] sont deux exemples utilisant cette technologie pour assurer la localisation de leurs utilisateurs. Les évaluations de tels systèmes montrent effectivement une erreur assez faible avoisinant le mètre dans des conditions météorologiques favorables. La figure 2.13, représente un récepteur D-GPS. L'inconvénient majeur de ce service est qu'il n'est que rarement disponible dans les milieux urbains et qu'il nécessite souvent un abonnement payant. De plus, le récepteur est très lourd et encombrant.



FIGURE 2.13 – Trimble Pathfinder Power, un exemple de récepteur D-GPS.

2.3.1.2 Le GPS assisté : A-GPS

L'avantage des GPS assistés réside dans la vitesse de la première connexion. L'A-GPS nécessite une connexion à un serveur pour récupérer les éphémérides précises des satellites. La connaissance de ces éphémérides, par ailleurs diffusées par les satellites eux-mêmes, mais à une faible fréquence, permet d'accélérer l'étape d'estimation de la toute première position (le "fix") qui passe de quelques minutes à quelques secondes. L'utilisation du A-GPS nécessite donc une connexion internet (le service est généralement offert par les opérateurs téléphoniques) pour faire une mise à jour quotidienne des éphémérides. L'avantage d'une telle technologie peut être important dans des cas de navigation pédestre comme à la sortie d'un magasin ou d'une station de métro. Dans ce cas, le système doit être capable de se mettre en route rapidement pour positionner son utilisateur.

L'utilisation du positionnement par GPS (D-GPS et/ou A-GPS) est l'approche la plus utilisée dans les systèmes d'aide à la navigation. Cependant, il existe d'autres techniques pour améliorer la précision du GPS ou pour s'y substituer en cas d'indisponibilité temporaire du service. Ces différentes approches reposent sur l'équipement de l'environnement et/ou de l'utilisateur avec différents capteurs et/ou émetteurs supplémentaires. Dans la suite nous présentons les techniques les plus connues et qui ont déjà été utilisées dans des systèmes d'aide à la navigation pour déficient visuel.

2.3.2 L'équipement de l'environnement

Il est possible d'équiper l'environnement dans le but de localiser un objet mobile. Cette deuxième catégorie de systèmes se base sur l'utilisation d'émetteurs et de récepteurs. Le principe consiste à placer dans l'environnement différents émetteurs (géo-référencés ou non) en vue de les détecter et de se positionner par rapport à eux. Plusieurs technologies existent avec des degrés de précision et une facilité de déploiement assez variés. Dans ce qui suit nous détaillons les techniques les plus utilisées pour le positionnement piéton.

2.3.2.1 Les puces RFID

La radio-identification connue sous l'acronyme RFID (en l'anglais Radio Frequency IDentification) est une méthode d'identification automatique qui permet de lire à distance le contenu de radio-étiquettes passives. Ces radio-étiquettes, qui peuvent être intégrées à des objets ou même placées sur les vêtements ou le corps, disposent d'une antenne et d'une puce électronique pour recevoir et répondre aux requêtes radio émises depuis un autre émetteur-récepteur. Deux exemple de système d'aide à la navigation pour non-voyants sont présentés par [Kulyukin *et al.* 2004]. Le dispositif présenté utilise un robot guide qui se base sur des puces RFID pour se localiser dans un environnement intérieur. Quant à [D'Atri *et al.* 2007], ils utilisent une canne longue sur laquelle un récepteur est fixé alors que le trajet est semé d'étiquettes. L'utilisateur doit suivre, en utilisant sa canne, le feedback sonore ou tactile généré suite à la détection d'une étiquette.

Ce type de système est précis en termes de positionnement car les puces RFID sont généralement détectables à quelques dizaines de centimètres de distance, sans fausse détection et sans risque d'erreur. On peut donc imaginer plusieurs configurations possible afin de pouvoir géo-localiser une personne en utilisant des puces RFID. Un tel système repose cependant sur une infrastructure assez lourde à mettre en place et assez coûteuse en termes de mise en service et de maintenance.

2.3.2.2 Le Bluetooth ou le WIFI

Le Bluetooth, est un protocole de communication de données à courte portée. Il utilise une fréquence radio courte distance et sert principalement à connecter facilement et sans fil des appareils électroniques entre eux. Un exemple d'application est présenté par [Nicolau *et al.* 2009] afin de localiser des déficients visuels dans les couloirs d'un bâtiment. Il est aussi possible d'utiliser cette technologie pour la localisation à l'extérieur [Bohonos *et al.* 2007].

Le Wifi, est un protocole de communication ayant une portée et un débit bien plus important que le bluetooth. La localisation par Wifi ressemble à celle par Bluetooth : elle approxime la position de la personne en se basant sur certaines caractéristiques de la propagation des signaux. [Kurata *et al.* 2011] proposent un système d'aide à la navigation qui utilise le réseau WIFI pour estimer la position de l'utilisateur.

L'inconvénient majeur de ces techniques de positionnement est que la précision dépend fortement du nombre de cellules installées, de leurs tailles et de la précision de la base de données qui référence la position de ces éléments. Ces techniques sont donc coûteuses et plutôt utilisables à l'intérieur (indoor). A notre connaissance, elles n'ont jamais été déployées dans un produit commercial d'assistance à la navigation des déficients visuels.

2.3.2.3 Les ultrasons

Les ultrasons (onde acoustique d'une fréquence supérieure à 20 000 Hz) permettent de localiser des objets par écholocation. En disposant des émetteurs dans l'environnement et un récepteur sur le mobile à localiser, il est possible de calculer la position du récepteur en mesurant les temps d'arrivée des signaux des différents émetteurs. Une évaluation de la localisation par ultrasons dans une maison équipée d'émetteurs est présentée dans le système Drishti [Ran *et al.* 2004]. Les auteurs font état d'une erreur de moins de 10 cm 90% du temps. Cette technique est, encore une fois, assez précise mais couteuse et difficile à mettre en place, en particulier dans des environnements de grande taille.

2.3.2.4 Le rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge (IR), est utilisé dans de très nombreuses applications : vision nocturne, communication sans fil, détecteurs d'intrusions, etc. Les infrarouges sont également utilisés pour la localisation. Tout comme la localisation à base d'ultrasons, on se sert de la communication entre les émetteurs et le récepteur à infrarouge pour calculer sa position. Un exemple d'utilisation d'infrarouges pour la localisation piétonne est décrit dans [Ertan *et al.* 1998]. Le système Talking Signs quant à lui, utilise le rayonnement pour aider les utilisateurs à détecter des cibles. Il repose sur un étiquetage de l'environnement pour permettre aux piétons déficients visuels de localiser et d'identifier des repères, des panneaux et des points d'intérêt dans l'environnement. Les messages, stockés dans des émetteurs infrarouges (étiquettes), sont réceptionnés par un dispositif embarqué par l'utilisateur et convertis en TTS. Le faisceau infrarouge permet de connaître la direction et la distance des étiquettes rencontrées. Une évaluation du système a montré son intérêt pour les non voyants mais nécessite là encore des investissements importants pour équiper l'environnement et assurer la maintenance des émetteurs.

2.3.3 La vision artificielle

La vision est le premier sens utilisé par les êtres humains et de nombreux animaux pour se localiser. En effet en reconnaissant un ou plusieurs indices connus et localisés (amers visuels), il est possible de se positionner dans l'environnement. L'approche utilisée en vision artificielle est similaire à l'approche humaine. Nous commençons par reconnaître un indice, puis nous nous positionnons par rapport à lui. Une fois l'objet reconnu, la localisation peut se faire au moyen de plusieurs mécanismes comme la triangulation (plusieurs objets reconnus) [Yuen & MacDonald 2005] ou par comparaison de la taille réelle de l'objet et sa taille apparente. Cependant, cela n'est possible que si un ou plusieurs objets ont été reconnus. Dans la littérature deux approches pour traiter le problème de reconnaissance par vision existent : la reconnaissance avec marquage préalable et la reconnaissance sans marquage préalable.

2.3.3.1 Reconnaissance par marquage préalable

Cette catégorie de systèmes requiert la présence de signes distinctifs facilement reconnaissables sur les objets d'intérêts (code à barre, QR code, etc). Le marquage de chaque objet à reconnaître peut s'avérer rapidement fastidieux et l'outil n'est plus utilisable dès que la personne se déplace dans un environnement qui ne serait pas marqué. Un exemple d'un tel système est présenté par [Makino *et al.* 1998].

2.3.3.2 Reconnaissance sans marquage préalable

C'est une approche moins contraignante mais également plus complexe du point de vue algorithmique car il s'agit de reconnaître les objets directement sans que ceux-ci soient marqués. La plupart des approches de reconnaissance et de localisation d'objets et d'obstacles utilisées pour guider les non-voyants ont longtemps été dominées par les algorithmes de « pattern matching », c'est à dire par confrontation d'un motif avec l'image dans laquelle il est recherché. Le domaine de l'analyse d'images a cependant fait d'énormes progrès ces dernières années et la plupart des algorithmes modernes sont maintenant implémentés et intégrés à la librairie Open Computer Vision maintenue par Intel.

Sans a priori Le système est capable de se positionner sans informations préalables sur son environnement aucune information sur les objets à reconnaître n'est fournie au départ. Ces systèmes peuvent utiliser différents types de capteurs pour reconnaître leur environnement (sonars, lasers, caméra, etc.). Parmi les techniques qui utilisent la vision sans a priori, il y a le SLAM en anglais (Simultaneous Localization And Mapping) ou CML (Concurrent Mapping and Localization). Cette technique a été proposée pour la navigation de robots ou de véhicules autonomes, placés dans un environnement inconnu. Au fur et à mesure des observations, la carte de l'environnement est enrichie par de nouvelles informations, sur lesquelles s'appuie la localisation, et la position des précédentes observations sont affinées en tenant compte des nouvelles observations.

Avec a priori Cette approche consiste premièrement à apprendre au système un objet puis dans un deuxième temps lui demander de le reconnaître. Plusieurs algorithmes existent et ont été testés dans des systèmes d'aide à la navigation pour non voyant. [Hub *et al.* 2004] [Hub *et al.* 2006] par exemple utilisent une approche basée sur une détection de contours puis sur une comparaison avec l'histogramme des couleurs du modèle appris au préalable afin de détecter des objets dans une chambre.

[Parlouar *et al.* 2009] présentent un système de détection de billets de banque pour non voyant en se basant sur un algorithme de reconnaissance de formes. Le moteur de reconnaissance utilisé est basé sur un mécanisme d'extraction des caractères saillants de l'image capturée et les comparer à un ensemble de modèles déjà appris au préalable.

Le principal atout de ces algorithmes est qu'ils sont robustes aux changements d'échelle et à la rotation contrairement aux algorithmes de convolution classiques d'un modèle dans une image. En effet, ces derniers ont une tolérance à la rotation et au facteur d'échelle qui est faible et il est donc nécessaire de créer beaucoup de modèles pour pouvoir reconnaître un objet dans différentes vues. Chaque modèle séparément est très rapide à corrélérer, mais la multiplication des modèles peut rapidement grever le temps de calcul. Les techniques s'appuyant sur l'extraction de caractéristiques invariantes comme SIFT et SURF tirent donc leur avantage de leur tolérance et de la nécessité de tester un seul modèle pour toutes les orientations et facteurs d'échelles. Un des principaux avantages de ces algorithmes par rapport aux autres est leur indépendance au capteur (caméra) puisque d'un capteur à l'autre, la relation spatiale entre les points d'intérêt est préservée. Ils ne sont en revanche peu adaptés pour reconnaître des objets en 3D puisque le motif visuel d'un objet peut beaucoup changer en fonction de l'orientation et de l'éclairage. Dans ce cas, ces algorithmes deviennent très coûteux car chaque face à reconnaître doit alors être apprise puis testée.

2.3.4 Les centrales inertielles

Une centrale inertielle est constituée principalement d'accéléromètres, de gyroscopes et de magnétomètres. Elle est capable de mesurer les accélérations linéaires et rotatoires du porteur de la centrale selon les 3 axes de l'espace. Cette technique s'apparente à l'intégration de trajet et nécessite de connaître la position et l'orientation de départ.

Les centrale inertielle sont indépendantes de toute infrastructure et sont fonctionnelles dans tout environnement. Cependant, leur inconvénient majeur est que leur performance est affectée par de nombreuses erreurs (biais et bruit) qui s'accumulent rapidement au cours du temps. Pour cette raison elles sont généralement couplées avec d'autres technologies permettant de les recalibrer pour fournir un positionnement fiable. En navigation par satellite, l'utilisation d'une centrale inertielle permet d'estimer la position même après la perte des signaux GPS, comme cela se produit fréquemment en environnements urbains. Quelques travaux ont aussi utilisé la centrale inertielle pour la localisation à l'intérieur des bâtiments [Nam 2011].

2.3.5 Discussion

La localisation du piéton demeure un champ de recherche très actif, plusieurs techniques existent. Le Tableau 2.4 présente une synthèse des techniques décrites dans la section précédente.

TABLE 2.4 – les différentes techniques de positionnement qui peuvent être utilisées dans un système d'aide à la navigation.

	Environnement		Infrastructure supplémentaire		Précision(m)
	Outdoor	Indoor	Dépendant	Autonome	
GPS	✓	-	-	✓	±(5-60)
D-GPS	✓		✓	-	±(1-5)
A-GPS	✓	-	✓	-	±(5-60)
Vison artificielle	✓	✓	✓	-	De 0 à infini en fonction de la distance
Infrarouge	✓	✓	✓	-	±(0,5)
UWB	✓	✓	✓	-	±0,5
WIFI / BT	✓	✓	✓	-	±0,5
RFID	✓	✓	✓	-	±0,1
IMU	✓	✓	-	-	En fonction du temps et de la précision initiale

Le GPS bien qu'il soit le système le plus répandu et le plus simple à utiliser, souffre d'une faible précision relative (supérieure à 20 m) qui, dans un contexte d'assistance à la navigation pédestre, peut s'avère souvent insuffisante. En centre-ville, où les canyons

urbains sont assez fréquents, la précision du GPS peut passer rapidement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. L'utilisation du D-GPS donne des résultats assez satisfaisants, mais reste limitée en raison de la faible présence des stations de correction terrestres et du prix de l'abonnement. De plus, les récepteurs D-GPS plus encombrants que les récepteurs traditionnels.

Plusieurs techniques complémentaires au GPS ont été utilisées dans les systèmes d'aide à la navigation pour déficient visuel. Les objectifs de ces techniques étaient de (1) améliorer la précision du GPS seul et (2) permettre un positionnement là où le GPS n'est pas opérationnel. Ces techniques s'appuient sur un équipement supplémentaire de l'utilisateur et/ou de l'environnement.

L'équipement de l'environnement avec des balises reste une entreprise assez lourde et coûteuse, et implique une maintenance importante. Le Wifi est le réseau le plus répandu, par contre il est difficilement utilisable en raison du nombre réduit d'émetteurs et l'obligation d'avoir une carte précise et à jour des positions des différentes balises. Le Bluetooth, quant à lui, reste une technologie à courte portée généralement utilisable à l'intérieur des bâtiments et non adaptée en extérieur. Le rayonnement infrarouge reste une technique limitée par la contrainte directionnelle, et le problème des obstacles qui empêchent le passage du signal. Ces deux contraintes rendent l'utilisation de cette technologie totalement impossible dans un milieu urbain avec les multiples obstacles présents (les bâtiments, les gens, etc.). Cependant, ces techniques peuvent présenter des intérêts pour aider l'utilisateur à repérer une cible dans la ville par exemple (cabine tél, arrêt de bus, passage piéton, etc.)

L'utilisation des centrales inertielles dans la navigation est de son côté une approche intéressante. Une centrale inertielle sert à estimer la direction et la vitesse d'un objet mobile. L'inconvénient est qu'elle ne peut pas fonctionner seule en raison de l'accumulation des erreurs de mesure. Elle doit donc être couplée avec un système capable de déterminer une position à une fréquence élevée pour procéder à des recalages. Ce type de positionnement est connu sous le nom de navigation à l'estime:

La vision par ordinateur est aussi une technique intéressante à exploiter vu le potentiel croissant qu'elle offre. L'état de l'art des algorithmes de vision artificielle fait apparaître que de nombreux algorithmes de reconnaissance d'objets peuvent être utilisés. Les méthodes de corrélation entre un modèle et une image par convolution (ou d'un modèle simplifié dans une image simplifiée, par réduction de la résolution ou transformation en primitives plus simples) sont très peu coûteuses en temps de calcul par rapport aux autres méthodes. Elles présentent le principal inconvénient d'être très peu tolérantes aux changements d'orientation ou d'échelle. Elles sont particulièrement adaptées à la reconnaissance d'objets qui seront toujours dans la même orientation (ex. mobilier urbain) et dont l'échelle dans l'image varie peu (objets lointains par exemple, puisqu'une variation de la distance à l'objet aura peu d'incidence sur la taille de l'objet dans l'image). De plus, ces méthodes très efficaces en temps de calcul permettent de modéliser des objets en 3D en créant des modèles pour chaque face de l'objet.

La fusion entre ces différentes techniques et méthodes apparaît aussi comme une alternative intéressante en vue d'améliorer la précision du positionnement. Plusieurs travaux se sont déjà intéressés à cette fusion. [Caron *et al.* 2006] par exemple présentent un algorithme pour la fusion entre les signaux du GPS et une centrale inertielle dans un contexte de navigation pour voiture.

2.4 Système d'Information Géographique

Les SIG (Système d'Information Géographique) sont de plus en plus développés et utilisés dans de nombreuses applications et domaines : le tourisme (gestion des infrastructures, itinéraires touristiques), le marketing (localisation des clients, analyse de site), la planification urbaine (cadastre, voirie, réseaux d'assainissement) ou le transport. Pour comprendre leur importance, il est aussi utile de connaître la diversité de leurs applications : la cartographie, la topographie, l'occupation du sol, la planification urbaine, la gestion des événements d'urbanisme, la gestion des risques, la connaissance et la prospective du tissu agricole, la gestion des sources d'eau, etc.

Pour Golledge et collaborateurs, [Golledge *et al.* 1991], [Golledge *et al.* 1998], le SIG est un outil de stockage, de manipulation, d'affichage, d'interrogation et d'analyse d'informations de nature spatiale. Cette définition met l'accent sur deux aspects relativement importants à savoir le stockage et la manipulation des données. Le premier implique la collecte et l'organisation des données sous un format bien déterminé. Le deuxième est relatif aux outils et techniques d'exploitation de ces données. La figure 2.14 représente le schéma d'un SIG.

La première utilisation d'un système d'informations géographique dans un système d'aide à la navigation pour déficients visuels remonte à 1985 [Loomis 1985]. Le principe consiste à utiliser cette carte numérique pour (1) calculer un itinéraire entre un point de départ et un point d'arrivée, (2) permettre à travers un couplage entre la position absolue (obtenue par GPS par exemple) et la cartographie d'effectuer le suivi du déplacement tout au long de l'itinéraire et finalement (3) d'accéder aux informations pour décrire l'environnement.

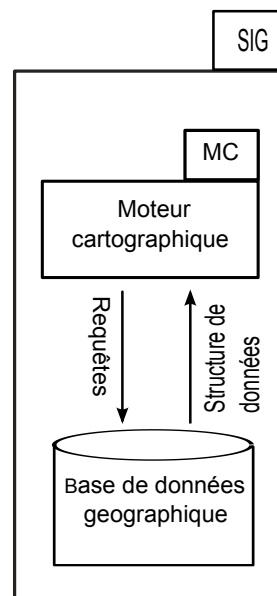


FIGURE 2.14 – La représentation d'un SIG : la base de données contient l'ensemble des informations géographiques et le moteur cartographique intègre les requêtes et assure la communication avec les autres modules du système.

2.4.1 La base de données

Adapter le SIG pour les besoins d'un déplacement piéton est indispensable. Cela implique la prise en compte de plusieurs données qui n'existent pas dans les SIG destinés à être utilisés pour l'assistance à la navigation automobile (trottoirs, passages piétons, etc.). Le problème s'intensifie dans le cas de la déficience visuelle où de nouvelles classifications de données s'imposent avec rajout de données supplémentaires qui serviront de points de repères et d'orientations. Peu d'études se sont intéressées à la spécification d'un SIG pour piéton déficient visuel. Les adaptations de bases de données à un déplacement piéton ainsi que les techniques de collectes et d'organisation restent peu développés. Même les systèmes commercialisés comme le Trekker ou le Kapten reposent sur l'utilisation d'un SIG commercial destiné aux véhicules. Les objets géographiques sont représentés selon trois niveaux : (1) géométrique, (2) topologique, (3) attributaire, thématique ou sémantique. Pour représenter numériquement une base de données spatiales, trois types d'entités géographiques sont utilisées, le point (x,y) , la ligne $((x_1,y_1),(x_2,y_2))$ ou le polygone $((x_1,y_1),\dots, (x_n, y_n))$.

Lors de la navigation, un SIG joue deux rôles principaux, le premier consiste à supporter le positionnement et ce par le mécanisme de « map matching » qui permet d'éviter les positions impossibles (à l'intérieur d'un bâtiment par exemple). Le deuxième consiste à contenir toutes les informations nécessaires et dont l'utilisateur pourra se servir pour comprendre son environnement (bâtiments, places, terrasses, etc.). Ces données sont extraites du SIG grâce à des fonctions d'extraction d'informations prévues à cet effet.

Différentes sources de données doivent être utilisées pour construire une base suffisamment riche et complète [Petrie *et al.* 1996]. Cependant, il faut aussi penser à les organiser d'une façon intelligente facilitant leur exploitation future. Dans ce qui suit nous allons aborder les principales sources de données éventuellement intéressantes pour la construction d'une base de données dédiée à un déplacement piéton ainsi que les classifications et les outils de collecte proposés dans la littérature.

2.4.1.1 Sources de données

Plusieurs bases de données libres ou propriétaires existent. Parmi les bases de données propriétaires, il y a celles qui sont commercialisées (Navteq, TéléAtlas, etc.) et celles qui sont la propriété de collectivités publiques ou de villes.

Les bases commercialisées Les deux bases les plus connus sont Navteq², et TéléAtlas³, rachetées respectivement par Nokia et TomTom en 2008, toutes les deux sont destinées en premier lieu à la navigation automobile. Elles proposent généralement une représentation précise et détaillée du réseau routier avec les panneaux de signalisations (Les interdictions, les déviations et les rues bloquées, les sens uniques, les accès limités et les hauteurs autorisées). Ces bases de données sont disponibles seules ou avec un moteur cartographique qui encapsule un ensemble de fonctions permettant la manipulation des données existantes.

La base de «Toulouse Métropole» C'est un deuxième type de base de données propriétaire que nous illustrons au travers de la base de Toulouse Métropole qui gère l'agglomération toulousaine. Cette base de données est accessible à partir d'un service web qui offre plusieurs services à savoir la visualisation des caractéristiques d'une zone précise, sa topologie et tout ce qu'elle contient (arbres, plots, abris bus, bouches d'égout, etc.). Pour

2. <http://www.navteq.com/>

3. https://fr.wikipedia.org/wiki/Tele_Atlas

ce qui concerne les primitives de manipulation des données, le SIG de Toulouse n'offre pas de fonctionnalités poussées et se limite aux fonctions basiques de calcul de distance entre deux points et calcul de la superficie d'une surface. La figure 2.15 représente un extrait de la représentation vectorielle extraite du SIG de Toulouse qui montre la représentation des différents objets recensés dans la base.

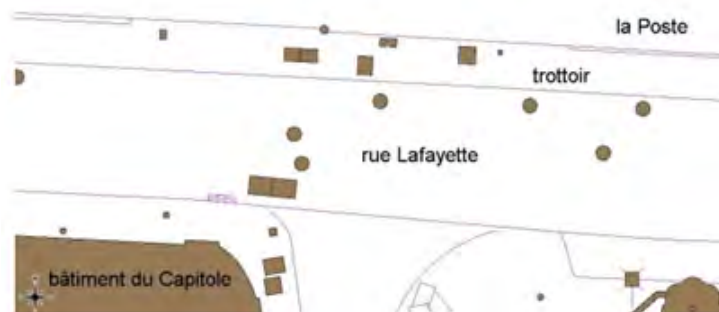


FIGURE 2.15 – Un extrait de la cartographie de Toulouse Métropole

Ces données sont structurées à partir de la problématique principale qui est la gestion d'un réseau urbain. Cet objectif est bien éloigné du nôtre (les objets représentés ne sont pas intéressants pour la navigation) qui est la navigation de personnes non voyantes.

La base de «Google Map» GoogleMaps est un service proposé par Google permettant de visualiser avec une précision ajustable, tous les endroits de la planète, ou encore de calculer des itinéraires pour différents types d'objets mobiles (Voitures, Piétons, Vélos). Cependant, lors d'un calcul d'un itinéraire piéton on remarque une absence totale d'informations sur les trottoirs ou mêmes les passages piétons. En effet, ces plateformes se limitent à modifier les contraintes de calcul fixées pour voitures (exp. Sens uniques pour quelques rues) et proposent un itinéraire à l'utilisateur. Actuellement, cette solution est extrêmement intéressante, cependant, pour les déficients visuels, l'absence d'informations précises sur le contenu de l'environnement pour le calcul d'itinéraire reste un problème majeur.

Les bases libres (Open street Map) Le projet OpenStreetMap⁴ (OSM) se présente comme une carte mondiale librement modifiable, compilée à partir d'informations renseignées selon un mode communautaire. Ce service libre et gratuit permet ainsi de récupérer des données géographiques de toute zone du globe. OpenStreetMap se distingue des autres services par sa gratuité, son ouverture et sa communauté très active. OSM est composé d'une riche base de données (bâtiments, parkings, restaurants, routes, types de trottoirs, etc.) et présente une facilité d'extraction de zones géographiques via le téléchargement de fichiers XML bien organisés et facilement compréhensibles. Cependant, les données relatives à la mobilité piétonne (trottoirs, passages piétons, etc.) sont rares et souvent imprécises quand elles ont été saisies par des utilisateurs non experts avec des outils de collectes non adaptés.

2.4.1.2 L'organisation des données géographique

Les données spatiales sont la composante essentielle d'un SIG. Dans la littérature, quelques travaux se sont intéressés à organiser ces données de façon à permettre leur

4. <http://www.openstreetmap.org/>

exploitation par les systèmes d'aide à la navigation pour des piétons déficients visuels.

[Swobodzinski & Raubal 2009] fait référence à 3 types d'objets. (1) **Les points de repères** définissent des éléments clés pour l'orientation et la navigation. Ils facilitent l'organisation et la catégorisation d'informations sur l'environnement. [Jacobson 1993] définit les points de repères comme une configuration constante et permanente d'un ou de plusieurs indices qui sont uniques dans un environnement donné. Ce sont des stimuli perceptibles par une personne aveugle et qu'elle peut utiliser pour déterminer sa position. (2) **Les obstacles** sont des objets situés sur l'itinéraire qui peuvent être détectés et évités simplement en utilisant la canne. (3) **Les objets dangereux** sont des objets situés sur le parcours qui ne sont pas détectables par la canne car ils sont situés dans une zone non couverte par le balayage de celle-ci. L'objectif d'une telle classification est de réaliser un guidage pas à pas sur des trajets prédéfinis. Cependant, l'inconvénient majeur de cette classification consiste à spécifier le type des éléments de l'environnement. Il est difficile de dire qu'un objet est un obstacle ou non, cela varie d'une personne à une autre, de la formation en locomotion reçue ainsi que des agilités de chaque personne à se déplacer. Un obstacle par exemple, peut servir comme repère selon le cas.

A un niveau plus descriptif de l'environnement, [Golledge *et al.* 1998] proposent la séparation des objets à stocker en 4 couches. La première couche appelée **transports** englobe le mobilier urbain en relation avec le déplacement (routes, pistes cyclables, chemins pour piétons, parkings pour voitures et parkings pour vélos, etc.). Une deuxième couche **bâtiments** contient toutes les constructions. Une troisième couche **espaces ouverts** contient les places, les espaces de récréations et les espaces verts. Et finalement, une dernière couche **autre** regroupe les autres objets comme les poteaux de feux de signalisation, les cabines téléphoniques, les escaliers, etc. La séparation en couche permet de faciliter les accès à la base de données lors de l'extraction de données environnementales par exemple. Elle permet aussi d'écartier les objets inutiles à la navigation piétonne dans des couches à côté. Cependant, cette classification rend difficile l'utilisation de données provenant de différentes couches simultanément car les objets sont classés grossièrement.

La classification des données géographiques pour les déficients visuels est un champ de recherche qui n'a pas été suffisamment étudié. Peu d'études se sont intéressées aux types de données à utiliser lors de la navigation piétonne en absence de vision. Les systèmes commerciaux sont tous basés sur des SIG commerciaux destinés à être utilisés par des voitures. Toutes ces raisons nous font penser qu'améliorer l'utilisabilité des systèmes d'aide à la navigation pour piétons passe par l'amélioration de la qualité des SIG utilisés et notamment la base de données.

2.4.2 Les outils d'extraction d'information

L'extraction d'information est une tâche importante. Calculer un itinéraire, savoir où est l'utilisateur ou extraire des informations sur l'environnement sont des fonctions dont la réussite de la tâche dépend fortement. Ces informations sont extraites à partir de la base de données par le biais de requêtes. Les requêtes sont envoyées par le système à la base de données via le moteur cartographique .

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés en particulier à deux fonctions que nous pensons importantes pour la réussite de la tâche de navigation. La première fonction est le calcul d'itinéraire tandis que la deuxième est l'extraction d'informations environnementales. Néanmoins d'autres fonctions comme la réponse à la requête «où suis-je?», «la distance entre les différents éléments» ou «la structure et l'agencement des bâtiments des différents objets de l'environnement» demeurent nécessaires et intéressantes

à étudier de plus près.

2.4.2.1 Calculateur d'itinéraire

Un calcul d'itinéraire est spécifique à l'objet mobile qui va s'en servir, par exemple l'itinéraire d'un poids lourd n'est pas le même que celui d'une voiture car il faut prendre en compte la hauteur, la largeur et la capacité de charge des ponts, ainsi que les routes interdites aux poids lourds, ce problème est le même lorsqu'il s'agit de calculer un itinéraire pour piétons, étant donné qu'il faut sélectionner des traversées de route au niveau des passages piétons, l'utilisation des trottoirs au lieu de la chaussée, la circulation libre sur les routes à sens unique, etc. Les moteurs de calcul d'itinéraire implémentés dans les SIG commerciaux sont destinés à être utilisés par les voitures et tiennent compte des spécificités du code de la route (sens unique, carrefour,..). En pratique, entre une adresse de départ et une adresse de destination, le moteur de calcul d'itinéraire trace les différents cheminements possibles tout en prenant en compte un ensemble de contraintes imposées par la nature de l'environnement. Dans le cas d'un calcul d'itinéraire pour piétons, le principe reste le même, mais les contraintes à satisfaire sont différentes. On ne parle plus de routes à sens unique, mais plutôt de trottoirs, de passages piétons, d'obstacles (travaux, abris bus, poteaux, etc.). Une deuxième dimension se rajoute à savoir les spécificités d'un déplacement piéton (arrêt, changement de direction ou demi-tours possibles à tous moments). En théorie des graphes, l'algorithme de Dijkstra [Dijkstra 1959] est le plus utilisé pour calculer le chemin le plus court dans un graphe connexe⁵. Cet algorithme est utilisé dans tous les systèmes commerciaux et les projets présentés auparavant. L'itinéraire calculé est un ensemble de points (un point à chaque changement de direction) et un ensemble d'arcs (chaque arc relie deux points successifs). Le poids de chaque arc dépend de sa longueur. L'itinéraire proposé est donc celui qui présente la plus petite longueur pour la somme des arcs.

[Völkel & Kühn 2008] proposent l'utilisation de plusieurs critères en plus de la distance pour la sélection d'un itinéraire. La sécurité est un facteur décisif dans le choix de l'itinéraire pour un non voyant [Dejeammes *et al.* 2008]. [Völkel & Weber 2008] introduisent la notion de choix multicritère en proposant un modèle permettant de définir un poids à chacun des critères définis et d'affecter à l'arc (la section entre deux points) un coût. Ce coût sera utilisé afin de calculer le chemin le moins coûteux. D'autres travaux sont allés dans la même direction en essayant de proposer d'autres modèles de minimisation de coût d'un arc.

2.4.2.2 Extraction de données

Pour extraire les informations environnementales, deux approches existent. La première consiste à anticiper la demande de l'utilisateur. C'est le système qui pilote l'interaction et fournit à l'utilisateur à intervalle régulier les informations que le système juge intéressante pour l'utilisateur. L'avantage d'une telle stratégie est de pouvoir répondre rapidement à l'utilisateur en cas de demande puisque les données sont déjà en cache. L'inconvénient est une grande consommation de ressources sachant que les accès à la base de données et la recherche d'information sont des tâches extrêmement gourmandes en termes de temps de traitement, ce qui est important sur un dispositif mobile ou généralement plusieurs processus sont lancés en même temps.

5. En théorie des graphes, un graphe $G = (S, A)$ est dit connexe si quels que soient les sommets u et v de S , il existe un chemin de u vers v . C'est-à-dire, s'il existe une suite d'arêtes (ou d'arcs correctement orientés dans le cas d'un graphe orienté) permettant d'atteindre v à partir de u .

Dans la deuxième stratégie, c'est l'utilisateur qui pilote l'extraction d'information et demande ce qu'il veut quand il veut. Une telle stratégie est assez intéressante en termes de précision car elle permet de répondre à l'utilisateur sur une question précise lancée (il y a quoi à ma droite par exemple) et donc apporte la réponse demandée. L'inconvénient est que cela nécessite de mettre en place toutes les requêtes imaginables et possibles ce qui n'est pas simple vu la différence entre les besoins et les spécificités de chaque déficient visuel et selon les formations reçues ou les capacités cognitives.

Dans un premier temps, nous nous limiterons à la façon d'extraire ces données. Dans leur système PGS, [Golledge *et al.* 1998] présentent l'utilisation d'un tampon mémoire de forme carrée faisant 30 x 30 mètres autour de la position de l'utilisateur et extraire tous les objets stockés dans la base de données géographiques présents dans cette surface. Le tampon est mis à jour 7 mètres avant que l'utilisateur atteigne la borne limite du tampon courant. La figure 2.16 représente un exemple de ces zones tampons.

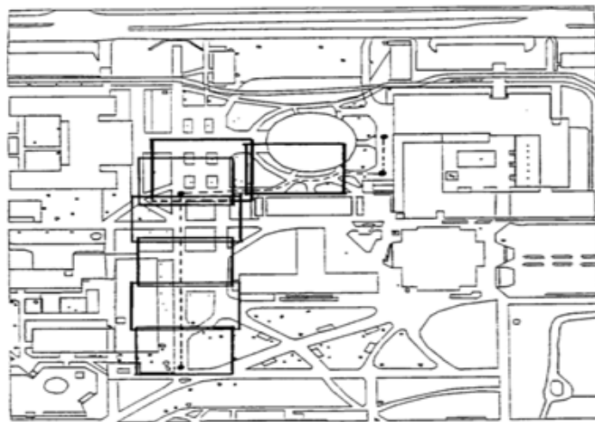


FIGURE 2.16 – Un exemple extrait de [Golledge *et al.* 1998] qui illustre l'utilisation des buffers pour extraire les informations environnementales

2.4.3 Discussion

Avec l'essor des nouvelles technologies de l'information et de la communication et l'évolution dans le domaine de la localisation temps réel, l'utilisation des SIG devient de plus en plus banalisée (e.g GPS voitures). Dans un système d'aide à la navigation, un SIG joue plusieurs rôles parmi lesquels nous pouvons citer l'amélioration du positionnement (exclusion des positions impossibles, plus de précision sur le trottoir). Le deuxième rôle consiste à calculer l'itinéraire à suivre pour atteindre la destination et aussi à fournir les informations relatives à l'environnement.

Afin d'utiliser d'une façon optimale un SIG dans un système d'aide à la navigation, la précision s'impose comme l'exigence principale. En effet plusieurs bases de données existent mais présentent une précision de l'ordre de quelques dizaines de mètres. En plus, nous pensons aussi que la complétude des bases de données peut être un facteur de réussite de la tâche de mobilité. En effet il est impossible de calculer un itinéraire adapté à un piéton non voyant en l'absence des trottoirs et des passages piétons. Il n'est bien sûr pas possible de guider un déficient visuel jusqu'à un passage piéton quand celui-ci n'est pas présent dans le SIG. La collecte d'informations sociales via les utilisateurs eux-mêmes reste une technique intéressante et peut donc jouer un rôle dans l'amélioration des SIG. Il s'agit d'ajouter des données ou bien d'un complément d'information précis pour un élément donné à un emplacement donné. Cette méthode offre des perspectives très intéressantes,

notamment pour ce qui est des informations ponctuelles (travaux, événements etc.). En matière de précision, plusieurs efforts doivent être faits en utilisant des outils de collecte plus précis comme le Lazer. Par contre, il est important de mettre en place des outils de vérification et de contrôle afin d'améliorer la qualité et d'homogénéiser les informations saisies par plusieurs utilisateurs.

Lors d'un calcul d'itinéraire, le SIG doit prendre en compte le point de départ et le point d'arrivée, comparer les différentes routes permettant de joindre ces deux points et décider, sur la base de critères de distance, de temps de parcours et de sécurité de l'itinéraire, quelle est la meilleure route à emprunter. De cette phase de calcul résulte l'itinéraire à suivre, composé d'un certain nombre de points de réorientation reliés entre eux par des segments de route plus ou moins longs. Ce processus reste encore mal adapté aux déplacements piétons et plus particulièrement ceux des non voyants. En effet tous les systèmes existants se limitent à calculer le plus court chemin sans considérer les autres critères. Il s'agit là aussi d'un point sur lequel nous pensons qu'il faut travailler afin de proposer des itinéraires mieux adaptés aux besoins et aux exigences des utilisateurs déficient visuels.

2.5 Des interactions non visuelles, en mobilité

En l'absence de vision, l'interface d'interaction joue un rôle important dans l'utilisabilité d'un EOA. En effet les modalités utilisées par les déficients visuels sont différents et les techniques d'interaction doivent donc l'être aussi. Trois critères doivent être respectés afin de concevoir des interfaces utilisables :

- Les modalités d'interaction doivent être non visuelles ; il faut adapter l'interface à la déficience,
- Utilisable avec une seule main, la deuxième est généralement occupée pour tenir le chien guide ou la canne,
- Utilisable dans un contexte de mobilité : un clavier comme on le connaît n'est pas une bonne idée.

L'interaction en entrée et en sortie d'un système d'aide à la navigation pour déficients visuels doit rester fiable et non-invasive pour éviter que la charge cognitive liée à l'utilisation du dispositif ne vienne perturber la navigation [Klatzky *et al.* 2006].

2.5.1 L'interaction en entrée

L'interaction en entrée permet à l'utilisateur de commander le système. Pour un système d'aide à la navigation, la saisie d'adresse est la commande principale. Plusieurs techniques existent, nous présentons d'une manière non exhaustive quelques unes.

2.5.1.1 Entrées gestuelles

Il existe de nombreux travaux sur l'utilisation de dispositifs mobiles par des personnes déficientes visuelles. Ces travaux concernent généralement l'utilisation de téléphones portables pour la saisie de messages. Le travail de [Guerreiro *et al.* 2008] repose sur l'utilisation d'un clavier identique à celui d'un téléphone portable avec un fonctionnement modifié. Il ne s'agit pas d'associer à chaque touche des caractères mais une direction. La touche 5 est la touche de validation, les touches 4 et 6 de navigation horizontale et les touches 2 et 8 de navigation verticale comme présenté par la figure 2.17(gauche). Les lettres sont disposées selon l'ordre alphabétique pour faciliter la recherche et décomposées en groupes commençant par une voyelle comme indiqué sur la figure 2.17(droite). Lors du parcours des lettres, un retour sonore assure la lecture de la lettre pointée pour diminuer la charge cognitive

nécessaire pour utiliser ce système. Pour valider le caractère choisi, il faut appuyer sur la touche 5 facilement repérable à l'aide du marqueur ou bien rester inactif durant un certain laps de temps. NavTouche [Guerreiro *et al.* 2010] se présente comme une amélioration de NavTap en substituant les touches par un écran tactile. Le principe de fonctionnement reste le même que celui de NavTap. L'intégration d'un système de complétion de mot a été présenté dans [Guerreiro *et al.* 2009].



FIGURE 2.17 – NavTap : Technique de saisie de texte adaptée aux déficients visuels d'après [Guerreiro *et al.* 2009]

2.5.1.2 La reconnaissance vocale

La reconnaissance vocale est maintenant suffisamment au point pour que des systèmes embarqués puissent interpréter directement les commandes parlées d'un utilisateur. Ce processus de reconnaissance reste toutefois un domaine de recherche très actif pour améliorer encore la précision et la vitesse de reconnaissance. La majorité des systèmes pour les déficients visuels se basent sur une reconnaissance de mots clefs (langage pseudo-naturel défini par une grammaire spécifique qui contraint fortement le problème de la reconnaissance). Siri⁶, de Apple ou Google now⁷ sont deux applications qui illustrent ce principe et qui permettent une interaction vocale via un serveur distant par reconnaissance vocale.

L'avantage de l'utilisation de la parole comme modalité d'interaction, est qu'elle est intuitive, facilement utilisable et naturelle. C'est pour ces raisons que la majorité des systèmes commerciaux présentés plus haut se basent sur cette technique d'interaction pour analyser les requêtes. De plus, laisse libres les mains et les yeux. La reconnaissance vocale présente néanmoins quelques inconvénients : elle est peu discrète et est très sensible au contexte sonore pour sa fiabilité. En plus, Le bon fonctionnement de la parole reste dépendant de la qualité du moteur de reconnaissance vocale utilisé.

2.5.2 L'interaction en sortie

L'interface en sortie consiste à fournir des informations à l'utilisateur. Elle utilise généralement la modalité auditive et somesthésie ou même une combinaison des deux :

- Modalité auditive au moyen de messages vocaux (synthèse vocale) et de messages sonores (sonification 3D) via un casque stéréophonique
- Modalité somesthésique : les sensations perçues par l'utilisateur peuvent alors se décomposer en deux catégories : soit par une stimulation tactile (affichage braille par exemple), soit par une stimulation proprioceptive (retour d'effort).

6. <http://www.apple.com/ios/siri/>

7. <http://www.google.fr/landing/now/>

2.5.2.1 L'utilisation de la modalité sonore

La modalité auditive est la plus utilisée chez les non voyants. Elle permet une restitution d'information assez précise. Plusieurs techniques existent.

La synthèse de texte consiste à transcrire du texte écrit en messages vocaux. Cette technique est très utilisée dans les serveurs téléphoniques ou les GPS de voiture par exemple. Les systèmes d'aide à la navigation comme Trekker ou Kaptan utilisent cette technique afin d'interagir avec les utilisateurs. Il s'agit généralement de messages textes générés par le système et prononcés par le moteur de synthèse. Il peut s'agir de messages lors d'un dialogue afin de saisir une adresse ou lors du guidage pour indiquer une direction.

Le son 3D est apparu ces dernières années avec l'émergence de nombreuses techniques de synthèse et de reproduction de la dimension spatiale du son. Il fait référence à la capacité de recréer des espaces auditifs virtuels où le son ne semble pas provenir de la source physique qui l'a généré (un haut-parleur, par exemple), mais d'une position de l'espace bien spécifique grâce à l'utilisation de plusieurs haut-parleurs ou d'un casque stéréophonique. Il est possible de localiser précisément en élévation et azimut une source sonore en champ lointain (>1 m) chez un sujet voyant [Blauert 1974] ou non-voyant mais la précision pour l'évaluation de la distance est moins bonne [Fukuda *et al.* 2003]. Comme présenté dans la section 2.1.1, l'équipe de Loomis a montré en premier lieu la faisabilité d'un guidage basé uniquement sur les sons 3D en situation réelle. Walker et Lindsay [Walker & Lindsay 2006] ont présenté une évaluation du système SWAN dans un environnement virtuel en utilisant les sons 3D pour guider les utilisateurs. Ces sons peuvent donc être utilisés pour indiquer une direction dans l'espace.

Une combinaison de la TTS et des sons 3D semble aussi être une bonne alternative pour positionner dans l'espace un message qui désigne par exemple un objet particulier [Parseihian 2012].

2.5.2.2 Les modalités tactile et haptique

La modalité kinesthésique a aussi été explorée par plusieurs équipes de recherche. [Van Erp *et al.* 2005] et [Heuten *et al.* 2008] par exemple, présentent deux dispositifs utilisant une ceinture vibrante pour indiquer les directions à entreprendre (voir figure 2.18). Différents combinaisons et d'intensités de vibrations sont utilisées pour couvrir les 360° autour de l'utilisateur. [Ross & Blasch 2000] proposent une interface tactile avec 9 vibreurs montés sous forme d'une matrice (3 X 3) sur un sac à dos placé sur le dos de l'utilisateur. [Henze *et al.* 2006] quant à eux, présentent un prototype d'une interface tactile qui doit être placé sur l'avant bras de l'utilisateur. [Ghouaïel *et al.* 2013] propose une interface tactile pour guider les touristes sur des itinéraires touristiques.

Ces interfaces ne sont pas conçues spécifiquement pour les non voyants. Ils sont proposées principalement pour palier les problèmes de l'interaction visuelle avec les systèmes de guidages.

Le retour de force a été aussi exploré pour la restitution des informations. Le Phantom est un dispositif à retour d'effort largement utilisé pour l'interaction dans les environnements virtuels. Il s'agit d'un stylet monté sur un bras robotisé avec 3 ou 6 degrés de libertés selon le modèle. BlindAid est un exemple d'environnement utilisant le retour d'efforts pour interagir. Dans le cadre de ce travail nous nous intéressons en particulier au positionnement, au SIGs ainsi qu'aux stratégies de suivi d'itinéraires.

Cependant, l'interaction avec le système reste un point crucial qu'il faut étudier spécifiquement. Plus de détails sur ce module sont présentés dans la thèse de Gaëtan Parseihian [Parseihian 2012].

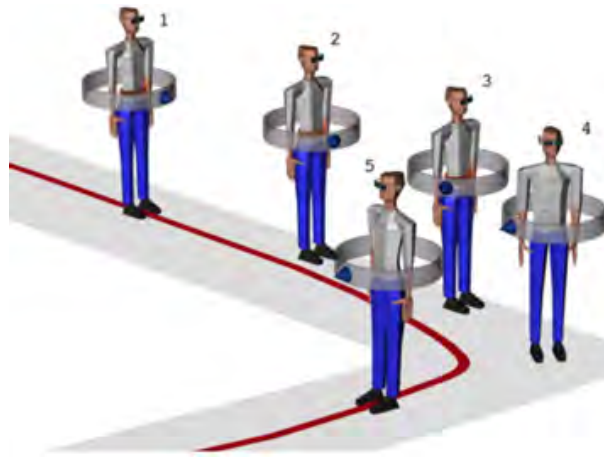


FIGURE 2.18 – L'interface tactile du Wayfinder. Une ceinture composée de 6 vibreurs [Heuten *et al.* 2008].

2.6 Discussion

Il existe différents moyens de guider une personne vers un point prédéfini de l'espace comme les systèmes RFID (Radio Frequency IDentification) ou RIAS (Remote Infrared Audible Signage) qui permettent, grâce à un système d'émission réception de guider un utilisateur tenant dans sa main un dispositif sensible à la direction et recevant les signaux émis par des balises, vers des points précis de l'espace comme un arrêt de bus, une cabine de téléphone ou encore un magasin. Plusieurs technologies s'appuyant sur des réseaux de balises communicantes (WIFI, Zigbee, RFID, etc.) sont en cours d'expérimentation. Mais à ce jour, aucune n'est encore opérationnelle et la localisation piédestre reste un challenge car un piéton est moins contraint qu'une voiture qui roule sur la chaussée, et peut se déplacer avec plus de libertés (changements de directions soudains, etc.) avec des trajectoires moins prévisibles. Ces raisons font de la localisation piétonne un challenge plus difficile à relever que la localisation automobile.

Un soin particulier doit aussi être apporté afin d'améliorer la précision du GPS. L'utilisation de la vision par ordinateur semble une idée intéressante pour cela. Les différentes approches évoquées dans la section 2.3.3 restent intéressantes, Cependant, l'approche par localisation nous semble la plus appropriée pour l'amélioration du positionnement. Cette approche est indépendante de l'infrastructure et ne nécessite pas un équipement particulier de l'environnement, contrairement à l'approche par marquage préalable par exemple. Pour augmenter la précision de la localisation, il est aussi possible de bénéficier d'informations précises sur les agencements des rues, des trottoirs et les objets qui les parsèment (cabines de téléphones, poteaux, arrêts de bus, etc.) par l'intermédiaire des systèmes d'informations géographiques (SIG). Autrement, la fusion entre ces différentes sources de données se présente aussi comme une alternative intéressante.

Un système d'aide à la navigation doit être capable de guider un piéton déficient visuel d'un point A vers un point B, en toute sécurité et avec précision, tout en lui fournissant des informations spatiales sur l'environnement qu'il traverse. Généralement les cartes utilisées sont conçues pour être utilisées par les voitures et sont inadaptées à une utilisation piétonne. La conception de systèmes d'information géographique adaptée au piéton devient une nécessité. En effet comme présenté dans la section 2.4, la plupart des projets de recherche pointent le manque de précision constaté dans les SIG existants tandis que les produits commercialisés utilisent des SIG destinés à un déplacement automobile. Les spé-

cificités d'un déplacement piéton ainsi que les exigences en termes de sécurité et précision font que la conception de SIG adaptés devient une priorité. L'adaptation des SIG passe en premier lieu par la collecte de données, ainsi que le stockage dans des structures de données appropriées. Un travail important doit aussi être réalisé afin d'adapter les fonctions d'extraction d'information comme le calcul d'itinéraire qui doit respecter les spécificités d'un déplacement piéton dans un premier temps, puis ceux des non voyants.

Comme présenté précédemment, le suivi d'itinéraire fait partie des fonctions internes qu'un système d'aide à la navigation doit réaliser efficacement pour assurer un guidage de qualité. Le suivi est un processus fortement basé sur les deux éléments évoqués ci-dessus à savoir : le positionnement et le SIG. En effet il s'agit de vérifier à tout instant la position de l'utilisateur par rapport à l'itinéraire calculé. Deux types de suivi existent : le suivi par section, illustré par un couloir virtuel tout au long du trajet [Golledge *et al.* 1998]. Ce suivi présente l'avantage d'être précis, en effet dès que l'utilisateur sort de ce couloir virtuel, un message d'erreur est joué. Cependant, il est difficilement réalisable avec la précision du GPS actuel. L'utilisateur se voit obligé de suivre à la lettre les indications au risque d'avoir de nombreux messages d'erreurs. Le deuxième type de suivi est plus souple car il donne plus de liberté à l'utilisateur sur les sections mais s'intéresse uniquement aux points d'itinéraires (points de réorientation). Ce suivi est assuré généralement par un calcul de distance entre la position de l'utilisateur et la position du point à atteindre. Une distance seuil est fixée, si celle-ci est atteinte, le point est donc validé et c'est le point suivant qui est indiqué. Cette stratégie présente l'avantage de donner plus de souplesse à l'utilisateur sur les sections mais reste limitée par la faible précision de positionnement. Une réflexion doit être menée sur les différentes stratégies de suivi afin d'améliorer le processus de guidage.

2.6.1 Conclusion

Les systèmes d'aide à la navigation basés sur la géo-localisation ont fait beaucoup de progrès mais demeurent inopérants pour guider en toute sécurité des piétons non-voyants, principalement à cause de leur trop faible fiabilité et de leur relative imprécision. On peut aussi noter qu'ils sont plutôt centrés sur une approche de navigation « pas-à-pas » et non pas sur une approche de guidage intuitif pour l'utilisateur non-voyant, en relation avec les processus de la perception spatiale, de la cognition spatiale et de la navigation humaine. Ce chapitre dresse un état de l'art des principaux systèmes d'aide à la navigation pour les déficients visuels. Nous avons choisi de séparer ces systèmes en deux catégories. La première catégorie recense, d'une manière non exhaustive, les principaux projets de recherche qui ont contribué de près ou de loin à la compréhension des problèmes rencontrés par les déficients visuels lors de leurs déplacements. Parmi ces projets, PGS et SWAN sont portés par des équipes de recherche fondamentale qui produisent de nombreuses connaissances importantes dans le domaine des aides au déplacement. La deuxième catégorie n'est qu'une continuité de la première puisqu'il s'agit des systèmes d'aide à la navigation pour non voyants commercialisés. Les associations de non-voyants rapportent de façon unanime que les aides à la navigation commercialisées aujourd'hui reposent sur une simple adaptation des dispositifs conçus pour les automobilistes. De façon générale, toutes ces aides s'adressent à des personnes qui ont une bonne mobilité et n'hésitent pas à se déplacer. Cependant, on constate que la diffusion de ces systèmes auprès des utilisateurs reste anecdotique. Ce manque d'enthousiasme s'explique par trois problèmes à savoir : (1) la faible précision, (2) la cartographie et le suivi mal adaptés et (3) l'interaction non adaptée aux spécificités des déficients visuels en mobilité.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté en détail les différentes

techniques de positionnement, de guidage ainsi que les systèmes d'informations géographiques utilisés. Cet état de l'art nous a permis d'identifier plusieurs champs d'actions possibles dans le but d'améliorer l'utilisabilité de ces systèmes. Nous avons défini trois principaux axes de recherche pour ce travail : le positionnement, les systèmes d'information géographiques et le suivi d'itinéraire.

L'ensemble des contributions proposées dans ce travail seront présentés et traités dans le cadre de NAVIG, un dispositif d'aide à la navigation développé pour permettre aux non-voyants et aux malvoyants de naviguer vers une destination voulue de façon fiable et avec une précision spatiale compatible avec la marche, sans interférer avec leur comportement de déplacement habituel. Nous nous intéressons en particulier à ces trois points :

- Le positionnement : nous proposons la fusion multi-capteurs comme solution pour l'amélioration de la précision du positionnement. Cette fusion se base sur un système de vision par ordinateur, le système GPS et un capteur inertiel. Les résultats obtenus montrent la faisabilité de ces techniques dans un contexte de navigation piétonne.
- Le système d'information géographique : nous proposons une classification des différents objets environnementaux permettant une bonne représentation de l'espace. Une architecture conceptuelle adéquate pour le stockage de ces données est aussi proposée. L'exploitation de cette classification est illustrée à travers un algorithme de calcul d'itinéraire adapté.
- Le suivi d'itinéraire : en vue d'améliorer le processus de guidage, nous proposons 3 nouvelles stratégies de suivi. L'évaluation des performances de ces différentes stratégies par rapports à la stratégie du cercle virtuel s'est déroulée dans un simulateur de guidage développé au cours de cette thèse. Il s'agit d'un environnement virtuel multimodal qui permet l'évaluation systématique des différents algorithmes proposés dans un environnement contrôlé et sécurisé.

Il nous paraît évident que les utilisateurs doivent être associés à la conception et à l'évaluation de ces systèmes pour qu'ils répondent à des besoins réels sans affecter le comportement habituel des utilisateurs. Cette étape doit être objectivée en mesurant de façon systématique l'apport des systèmes de suppléance et en vérifiant que les capacités de perception et d'action, et donc l'autonomie des utilisateurs sont bien augmentées par ces dispositifs.

Vers un positionnement, un SIG et un suivi adaptés

Sommaire

3.1	Méthodologie de conception	60
3.1.1	Utilisateurs et participants	60
3.1.2	La conception participative avec les déficients visuels	61
3.2	Besoins des déficients visuels dans la tâche de navigation	62
3.2.1	Déroulement	62
3.2.2	Les données géographiques	63
3.2.3	Le guidage sur un itinéraire	64
3.3	Architecture du Système NAVIG	65
3.4	Améliorer le positionnement par la fusion de données	66
3.4.1	Le positionnement GPS	68
3.4.2	Positionnement par vision artificielle	71
3.4.3	Fusion entre GPS et Vision artificielle	76
3.4.4	Résultats préliminaires du moteur de fusion	77
3.4.5	Discussion	82
3.5	Un système d'information géographique adapté	83
3.5.1	La base de données	83
3.5.2	Le moteur cartographique	91
3.5.3	Le serveur SIG	95
3.5.4	Discussion	96
3.6	Suivi d'itinéraire et guidage pour les piétons déficients visuels	97
3.6.1	Le guidage dans NAVIG	97
3.6.2	Vers un suivi d'itinéraire adapté à un déplacement piéton	98
3.6.3	Le contrôleur de dialogue	103
3.7	Prototypage et preuve de concept	106
3.7.1	Discussion	108
3.8	Conclusion	109

Comme précédemment indiqué, cette thèse s'est inscrite dans le cadre du projet NAVIG (Navigation Assisté par VIsion artificielle et Gnss). Dans ce chapitre nous allons présenter en détail le système NAVIG qui est un système d'assistance à la navigation pour les non-voyants. Nous nous limiterons ici aux aspects du système touchant à l'aide à la navigation. Nous présentons nos différentes contributions en relation avec le module de positionnement, le système d'information géographique et le suivi d'itinéraire. Le prototype NAVIG intégré sera présenté à la fin de cette partie. Nous présenterons aussi une preuve de concept du dispositif dans le cadre de tests préliminaires avec des utilisateurs déficients visuels.

3.1 Méthodologie de conception

La prise en compte des exigences des utilisateurs lors de la conception des différents modules du système NAVIG est importante étant donné l'impact sur l'utilisabilité du système. Afin de prendre en compte les besoins des utilisateurs tous au long des phases de réalisation du projet, nous avons adopté une méthode de conception participative centrée sur les utilisateurs. Nous pensons qu'il est fondamental d'associer les usagers à toutes les étapes du développement du projet, a fortiori lorsque l'objet de la conception s'adresse à des utilisateurs déficients.

La conception participative est une méthode de conception des systèmes interactifs qui implique les utilisateurs dans l'ensemble du processus du développement. Beaucoup de travaux ont été menés sur cette méthodologie. Il existe un grand nombre de techniques et d'outils pour mettre en œuvre un tel processus. Il n'existe pas de procédure standard, mais quelques règles de base pour la mise en œuvre sont définies par la norme ISO 13407 « Processus de conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs » Parmi ces recommandations :

- Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation
- Spécifier les exigences liées à l'utilisateur
- Proposer des solutions de conception
- Evaluer les conceptions par rapport aux exigences

Dans la phase de conception, il paraît donc utile de mettre en pratique des méthodes de créativité, comme par exemple les brainstormings, afin de produire de nouvelles idées. Il existe des variantes et des méthodes plus spécialisées comme le « Group Elicitation Method » [Boy 1997] qui propose le « brainwriting », une variante écrite du brainstorming. Cependant ces méthodes ne sont pas facilement utilisables avec des non-voyants parce que les techniques de partage d'idées s'appuient fortement la vision. Dans le cadre du projet NAVIG nous avons eu la chance d'avoir l'institut des jeunes aveugles de Toulouse à nos côtés comme partenaire. Ce partenariat nous a permis d'avoir un groupe de déficients visuels motivés par le projet et prêt à participer aux différentes réunions de conception participative ou aux campagnes d'évaluations (que soit pour le test de composants ou lors de l'évaluation finale du système NAVIG).

3.1.1 Utilisateurs et participants

Des méthodes pour sélectionner et constituer un panel représentatif de la population existent [Muller *et al.* 2001]. Dans le cadre du projet NAVIG, et en collaboration avec l'Institut des Jeunes Aveugles de Toulouse (IJA) nous avons constitué un panel de déficients visuels regroupant une vingtaine de personnes motivées et volontaires. La composition de ce panel d'utilisateurs, leur âge, sexe ou expérience, peut avoir un grand impact sur les résultats des séances de conceptions. Agés de 16 à 67 ans, tous ces utilisateurs étaient volontaires pour participer à des séances de conception participative ou d'évaluation de nouvelles techniques. La figure 3.1 représente le panel choisi en fonction de l'âge.

En outre nous disposons d'un tableau qui décrit ces utilisateurs selon un ensemble de critères :

- Niveau de la déficience / possibilités visuelles (mal ou non-voyant)
- Cause de la cécité : déficience visuelle de naissance (congénitale) ou tardive (acquise)
- Capacité à lire le Braille
- Degré d'autonomie
- Expériences de déplacement
- Aide à la mobilité habituelle (utilisation d'une canne ou d'un chien guide)

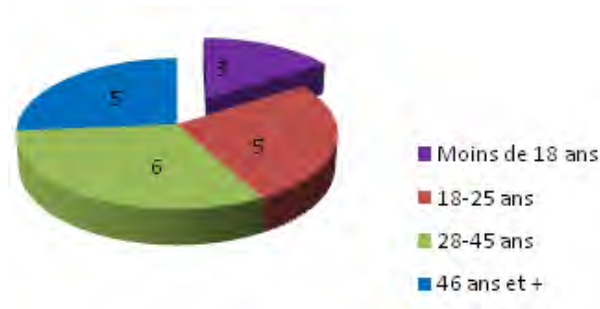


FIGURE 3.1 – la représentation du panel participant dans le projet NAVIG

- Expérience des outils informatiques et équipement personnel (lecteur d'écran, plage Braille, etc.)

Ces données seront utilisées dans une deuxième phase pour choisir les utilisateurs par rapport aux séances de conception, expérimentation et évaluation prévues.

3.1.2 La conception participative avec les déficients visuels

Le brainstorming est une technique qui s'appuie sur des signaux de communication assez diversifiés comme l'écriture et la gestuelle. Dans une conversation, la sémantique du discours verbal dépend beaucoup de la mimique faciale et de la gestualité du locuteur. Pour [Richaume-Crinquette Anita 1990] l'inaccessibilité à la gestualité des autres pour les DV peut être un frein à la créativité et pourra aboutir assez souvent à des malentendus ou à des difficultés de communication. Les gestes ont également un rôle dans la prise de parole et le changement d'orateur, d'autant plus que le groupe est nombreux. Dans ce contexte là, un DV perd beaucoup des informations nécessaires pour prendre la parole et proposer ses idées.

Afin de d'accroître nos chances de faire émerger de nouvelles idées, toutes les réunions réalisées avec les DV tout au long du cycle de conception, d'implémentation ou de validation ont respecté les recommandations proposées par [Brock *et al.* 2010]¹. La figure 3.2 a été prise lors d'une séance de travail avec les non voyants.

- Pour la composition de groupes d'utilisateurs déficients visuels, intégrer les critères spécifiques comme le niveau de déficience et sa durée (de naissance ou tardive), l'autonomie, la capacité à lire le braille ou l'expérience des outils informatiques.
- Choisir le lieu de réunion en tenant compte de son accessibilité par les transports publics, éventuellement prévoir des moyens de transports alternatifs ou accompagner les personnes.
- Limiter la taille des groupes (10 personnes maximum)
- Placer les personnes en fonction de l'accessibilité et dans une salle assez grande pour faciliter l'identification vocale des participants, garder des places fixes pendant toute la durée de la réunion
- Faire un tour de table ordonné de tous les participants ou observateurs au début de chaque réunion.
- Bien gérer le brainstorming en contrôlant le tour de parole, donner du feedback sonore aux notations, répéter les idées, réorganiser ou structurer oralement les idées pour faciliter la mémorisation.

1. Ce travail a notamment été réalisé dans le cadre du projet NAVIG



FIGURE 3.2 – Déroulement des séances de Brainstormings.

3.2 Besoins des déficients visuels dans la tâche de navigation

Le travail décrit dans cette partie a été réalisé en collaboration avec des psychologues et des ergonomes du LIMSI, partenaires dans le projet NAVIG. Il est toujours important de rappeler que les systèmes d'aide à la navigation sont proposés non pas pour remplacer la canne blanche ou le chien guide (aides traditionnelles à la mobilité) mais comme un outil complémentaire d'assistance. Les travaux de [Gallay *et al.* 2012], [Noordzij *et al.* 2006] ont montré que dans la plupart du temps, les non voyants utilisent une représentation spatiale egocentrique pour leurs déplacements. Cependant il est toujours important et nécessaire d'avoir une représentation allocentrique en cas de changement de direction par exemple (voir la section 1.3.1). Dans ce manuscrit, nous allons présenter quelques résultats des différents brainstormings et réunions de conception réalisés.

3.2.1 Déroulement

Le recueil des besoins des utilisateurs a été réalisé en 4 phases, la figure 3.3, présente un utilisateur lors de la réalisation d'un parcours au centre ville :

- Les brainstormings : Plusieurs réunions organisées. Chaque réunion avait comme objectif de répondre à une question un problème conceptuel touchant l'un des modules du système NAVIG. Parmi les sujets abordés nous pouvons citer les informations attendues lors d'un déplacement, la définition d'un itinéraire adapté, les interactions avec le système, etc.
- Déplacement sur site : Plusieurs sorties ont été organisées avec différents utilisateurs. Un utilisateur par sortie a été invité à faire un trajet entre deux points. Nous avons pu observer différents comportements et stratégies adoptés. Différents scénarios ont été réalisés, avec ou sans préparation d'itinéraire, trajet connu ou inconnu et utilisation de canne ou de chien guide. Nous avons aussi filmé les différentes sorties. Nous avons profité aussi de ces sorties pour recueillir des données qui serviront plus tard en équipant des utilisateurs avec un GPS ou des Caméras (Voir section 3.4)
- Réunions avec les formateurs en locomotion : Ces réunions nous ont permis de comprendre les principes des formations en locomotion ; les différentes stratégies apprises aux DV pour pouvoir se déplacer d'une façon autonome.
- Un premier questionnaire nous a permis de collecter différentes informations concernant le type de cécité, le niveau de locomotion, ainsi que les différents besoins de ces utilisateurs. Dans une deuxième phase, nous avons pu acquérir 3 des principaux systèmes commercialisés décrits dans le chapitre 2 (Trekker, Kapten, Kapten+). Ces systèmes ont été prêtés à des utilisateurs intéressés pour les utiliser dans leurs déplacements quotidiens pendant une période de 15 jours. Suite à cette utilisation

les utilisateurs ont répondu à un questionnaire sur les problèmes rencontrés et les améliorations qu'ils pouvaient proposer.

L'analyse des résultats de ces différentes phases nous a permis de dégager plusieurs résultats intéressants qui nous ont servi lors de la conception des différents modules du système NAVIG. nous présentons dans cette section quelques éléments de l'analyse [Gallay *et al.* 2012].



FIGURE 3.3 – Deux photos d'un utilisateur non voyant observé pendant différents trajets.

Nous présentons en détails dans la section suivante les résultats relatifs aux domaines étudiés dans cette thèse. Par ailleurs plusieurs recommandations ont été tirées pour concevoir des interactions adaptées. Parmi lesquelles :

- Plusieurs niveaux de détails doivent pouvoir être fournis par le système en fonction du degré d'expertise en locomotion de l'utilisateur (novice, intermédiaire ou expert).
- Le dispositif ne doit pas émettre trop de sons, ni indiquer trop d'informations pour ne pas saturer l'utilisateur. Les sons du système doivent être facilement différenciables des sons de l'environnement.
- Différents types de sons disponibles. Certains participants souhaitent avoir des sons électroniques (type jeux vidéo), d'autres des sons réels hors contexte de l'environnement (comme des sons marins par exemple).

Les recommandations pour la conception de l'interface utilisateur ont été respectées et traitées en détail lors de la conception de l'interface de sortie. Ce travail a d'ailleurs fait l'objet d'un deuxième travail de thèse dans le cadre du projet NAVIG [Parseihian 2012].

3.2.2 Les données géographiques

Les utilisateurs étaient plutôt d'accord sur le fait que les **indices** ou **repères** sont les indications les plus implorantes à avoir. Ces informations permettent de prendre des décisions et de recevoir une confirmation [Loomis *et al.* 2001], [Gaunet 2006] Les indications sur l'organisation et la **structuration de l'environnement** sont aussi appréciées mais pas autant que les repères.

Au niveau des critères qui guident le choix d'un itinéraire en particulier, les participants se sont accordés sur le fait qu'il faut préférer les passages simples, les rues calmes (avec peu de trafic piéton et automobile), les passerelles et rues piétonnes (pour permettre d'accélérer la marche) et le trajet le plus court si le temps presse. En outre, un ensemble de **points difficiles** (à éviter si possible) a également été défini :

- Les ronds points et les gros carrefours, du fait de la difficulté à comprendre leur agencement

- Les places, les grands espaces, pour la difficulté à s’orienter et à marcher droit sans repères
- Les trottoirs trop larges et ceux où sont présents de nombreux obstacles
- Les trottoirs trop étroits et les zones encombrées de poteaux et barrières, qui obligent souvent à marcher sur la chaussée
- Les zones partagées où les voitures et les cyclistes sont difficiles à détecter.

Ces résultats sont complémentaires avec ceux déjà établis par [Gaunet & Briffault 2005] concernant la description des différents éléments de l’environnement et notamment les carrefours. Ces indices peuvent être utilisés lors du calcul d’itinéraire pour évaluer un niveau de difficulté globale du parcours. Les utilisateurs pourront utiliser ce niveau de difficulté de deux manières :

- Le système présente les différents itinéraires possibles avec le niveau de difficulté et le temps de parcours prévu. À l’utilisateur de choisir le trajet qu’il souhaite emprunter.
- L’utilisateur fait une requête d’itinéraire en définissant un seuil de difficulté maximal. Le système choisit alors l’itinéraire le plus court possible correspondant aux critères sélectionnés.

Lors de la phase de préparation, les utilisateurs souhaiteraient avoir la description de l’itinéraire à la manière d’une carte (vue du ciel, point de vue allocentré) ou d’un trajet (description d’itinéraire donné par un instructeur en locomotion, point de vue égocentré). Pour répondre à ce besoin, un projet de carte tactile interactive est en cours de réalisation dans l’équipe [Brock *et al.* 2012].

Assurer cette fonction convenablement passe par un système d’information géographique adapté. En effet, pour pouvoir extraire les informations intéressantes, il faut que ces informations soient présentes dans le SIG et notamment répertoriées et organisées correctement dans la base de données géographiques.

3.2.3 Le guidage sur un itinéraire

Après le travail de brainstorming réalisé en collaboration avec le LIMSI, trois modes de guidage ont été identifiés :

- Le mode Petit Poucet qui consiste à se déplacer vers des balises sonores virtuelles dont l’intensité augmente avec la diminution de la distance. Lorsque l’utilisateur atteint une balise, celle-ci s’éteint et la suivante s’allume.
- Le mode Coach qui consiste à suivre un guide virtuel situé quelques mètres devant l’utilisateur. Comme pour la préparation d’itinéraire, suivant le niveau de détail choisi par l’utilisateur, le coach peut émettre un son en continu ou par intermittence (type bruit de pas, sifflements) ou bien encore n’émettre des sons que lorsque l’utilisateur s’écarte du chemin.
- Le mode Touriste qui doit permettre à l’utilisateur de découvrir de nouveaux endroits. Le déplacement n’est plus forcément utilitaire mais a pour but par exemple d’explorer un nouveau quartier ou une nouvelle ville. Dans ce mode, l’utilisateur ne souhaite pas arriver à un point précis (le guidage en soi n’est donc pas nécessaire) ; il souhaite seulement découvrir ce qu’il y a autour de lui. La description de l’environnement pourrait, à la demande, être réalisée à 360° en faisant un panorama de ce qui entoure l’utilisateur et en le décrivant avec une synthèse vocale spatialisée.

Cependant, pour pouvoir assurer les différents types de guidage proposés, il est nécessaire d’utiliser une stratégie de suivi d’itinéraire. En effet, quel que soit le mode de guidage utilisé, il est nécessaire de connaître la position précise de l’utilisateur par rapport à l’itinéraire pour fournir des informations pertinentes. Le guidage regroupe les instructions

présentées et la façon dont ces instructions sont présentées à l'utilisateur afin d'atteindre la destination voulue [Gaunet & Briffault 2005] alors que le suivi, est une fonction interne au système qui permet de connaître à tout instant la position de l'utilisateur par rapport à l'itinéraire calculé.

Nous avons conçu la base de données géographique, la partie dédiée au guidage et au suivi d'itinéraire dans NAVIG en nous appuyant sur l'ensemble des résultats issus de l'étude des besoins et l'état de l'art du domaine.

3.3 Architecture du Système NAVIG

NAVIG se base évidemment sur les 3 composants principaux d'un dispositif d'assistance à la navigation ; à savoir un module de positionnement, un système d'information géographique et un module d'interaction. L'architecture du système est représentée dans la figure 3.4. En plus de ces trois modules, le contrôleur de dialogue est aussi représenté. Il s'agit de l'agent central de NAVIG ; plus de détails seront présentés dans la section 3.6.3.

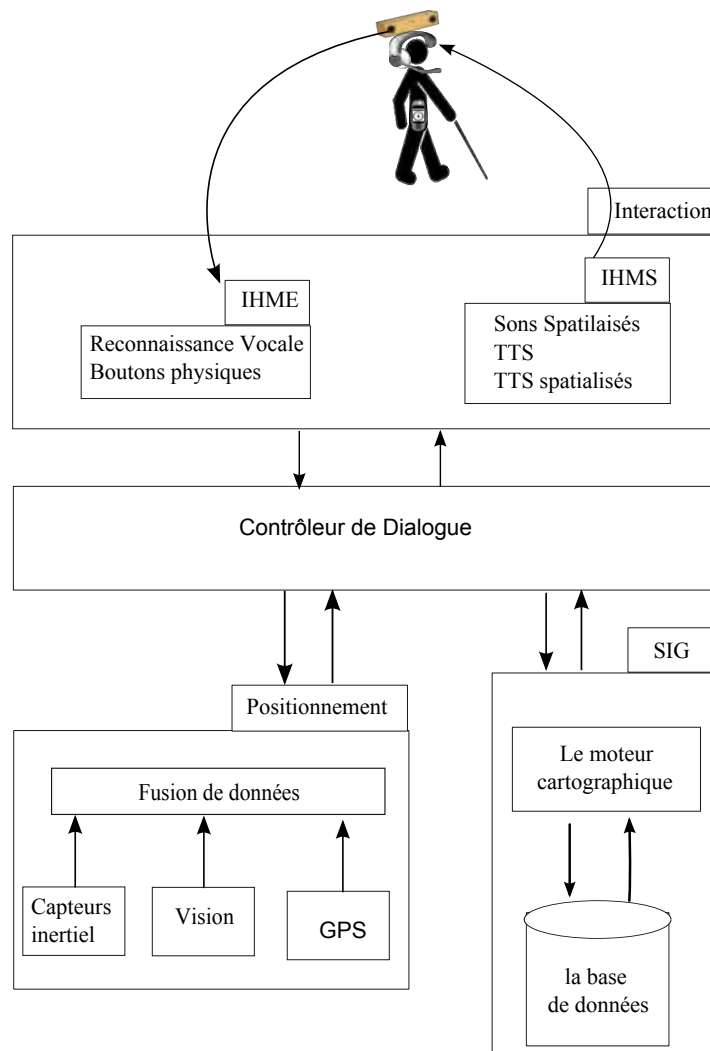


FIGURE 3.4 – Architecture globale du système NAVIG.

Le projet NAVIG fait intervenir plusieurs partenaires issus des milieux académiques et industriels. Cette hétérogénéité rend complexe la conception et l'implémentation de

systèmes interactifs, notamment en raison des multiples environnements logiciels et matériels utilisés. Les environnements de développement sont pour la plupart très cloisonnés et limités à des plateformes logicielles ou matérielles spécifiques. Dans le cadre de NAVIG deux choix s’offraient à nous :

- Choisir un seul environnement de développement cohérent mais au prix de potentialités restreintes
- Opérer sur différentes plateformes mais avec les problèmes de communications et d’intégration de ces développements au sein d’un système interactif performant.

Nous avons opté pour la deuxième solution, en résolvant les problèmes de communication et d’intégration grâce à un bus logiciel (middleware) permettant l’échange de messages sur un mode événementiel selon une architecture totalement distribuée. Nous avons choisi d’utiliser le bus Ivy développé sous licence LGPL par la DTI/SDER (DGAC) ².

Ivy fonctionne par échange de messages purement textuels d’un agent à un autre. Aucune structure de données complexe et typée ne peut être envoyée. Cette restriction aux seules chaînes de caractères permet de rendre compatibles les données sous la forme d’un standard disponible sur toutes les plateformes et dans tous les langages. Les différents modules envoient et reçoivent les messages sur le réseau local. Ainsi chaque module peut s’abonner et écouter des messages filtrés par un préfixe de message (textuel) et invoquer une fonction événementielle à chaque réception de message. Il est ainsi possible de supprimer un module, le simuler ou le remplacer très facilement du moment que les modules sont sur le même sous-réseau.

Une vue d’ensemble des différents modules du système NAVIG est présentée dans le tableau 3.1. Pour chaque module, le rôle principal est décrit. Dans la suite nous nous intéressons en détails aux modules traités dans le cadre de cette thèse à savoir le module de positionnement, le SIG et le contrôleur de dialogue (CD).

La communication entre ces différents modules est assurée par le bus Ivy (sauf pour le SIG où les échanges se font par un socket). Les messages envoyés sur le bus sont précédés par l’acronyme du module émetteur. Cela permet aux autres modules de s’abonner à un type particulier de messages et donc de ne recevoir que les messages désirés.

3.4 Améliorer le positionnement par la fusion de données

L’un des inconvénients majeurs des systèmes d’aide à la navigation pour DV est leur manque de précision qui ne permet pas d’estimer suffisamment précisément la position du piéton. Dans ce travail, en collaboration avec Jiri Borovec, Stagiaire, IRIT [Borovec 2011], O. Gutierrez (ingénieur IRIT) et A. Brillhaut (doctorant IRIT/CerCo) nous avons cherché à améliorer le positionnement dans le système NAVIG grâce à une fusion multi-capteurs. Pour cela nous utilisons un récepteur GPS, des caméras embarquées et une centrale inertielle. Comme je le décrirai par la suite, nous avons pu montrer que la position résultante est plus précise et permet, par conséquent, un guidage plus efficace des DV.

L’approche de fusion NAVIG (figure 3.5) repose sur 3 sources d’informations :

- Un récepteur GPS qui renvoie la position, la direction et la vitesse estimées de l’utilisateur.
- Un module de vision artificielle qui estime à son tour la position et l’orientation de l’utilisateur.
- Une base de données géographique détaillée qui contient les informations nécessaires à un déplacement piéton et contient l’ensemble des données visuelles utiles au module

2. <http://www.tls.cena.fr>

TABLE 3.1 – La liste des modules du système NAVIG, leurs acronymes dans le reste de ce manuscrit ainsi que leurs rôles

Agent	Acronyme	Rôles principaux
Contrôleur de Dialogue	CD	<ul style="list-style-type: none"> - Gérer l'ensemble des modules - Assurer le suivi d'itinéraire - Gère l'interfaçage avec l'utilisateur à travers IHMS et IHME
Vision embarquée	SNV	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de cibles dans l'environnement
GPS augmenté	Angéo	<ul style="list-style-type: none"> - déterminer la position de l'utilisateur en utilisant la centrale inertielle et les signaux GPS
Orientation de la tête	Capt	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer l'orientation de la tête de l'utilisateur par rapport au nord au moment de la détection d'une cible
Fusion	FUS	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer une position consolidée
Interaction en sortie	IHMS	<ul style="list-style-type: none"> - Présenter les informations à l'utilisateur
Interaction en entrée	IHME	<ul style="list-style-type: none"> - Interpréter les instructions de l'utilisateur
Système d'Information Géographique	SIG	<ul style="list-style-type: none"> - Contient toutes les informations géographiques - Assure le calcul d'itinéraire - Assure l'extraction d'information sur l'environnement

de vision embarquée (voir section 3.5.1)

Dans ce qui suit nous allons présenter les différents capteurs utilisés ainsi que le moteur de fusion.

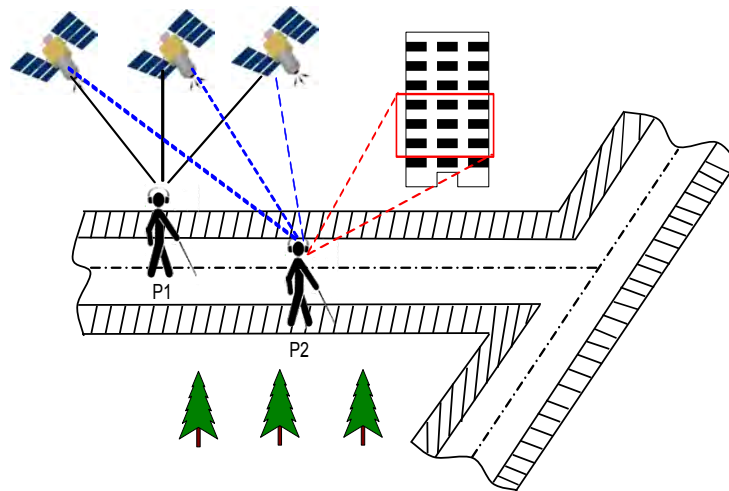


FIGURE 3.5 – Le Principe de l’approche de fusion NAVIG. Le module de positionnement du système NAVIG repose sur la fusion des données GPS et de la position estimée par le module de vision artificielle embarqué par l’utilisateur

3.4.1 Le positionnement GPS

Angéo-Mobile³ est un système d’aide à la navigation pour DV commercialisé par la société Angéo, une PME Toulousaine partenaire dans le projet NAVIG. Dans le cadre du projet NAVIG nous utilisons le boîtier Angéo-Mobile comme un récepteur GPS augmenté avec une centrale inertielle. La figure 3.6 présente l’interfaçage d’Angéo dans le système NAVIG. Le boîtier Angéo est intégré dans le système NAVIG à travers une connexion USB. Un agent Ivy embarqué sur le boîtier a été développé pour assurer la communication avec le reste du système. L’agent Angéo émet un message correspondant à la position estimée. Nous avons développé aussi un deuxième agent qui renvoi sur le bus Ivy les appuis bouton. Deux messages sont envoyés à chaque appui (appui et relâche), ce qui nous permet aussi de gérer les appuis longs.

Le boîtier Angéo embarque principalement un processeur sous Unix, une antenne GPS et une centrale inertielle. La position renvoyée par Angéo sur le bus Ivy est le résultat d’un traitement en amont. Il s’agit d’une fusion entre la position brute reçue par l’antenne GPS et la centrale inertielle embarquée. Ce traitement est propre à Angéo et protégé par la convention de coopération du projet. Nous ne connaissons donc pas les détails de ce traitement et nous considérons Angéo comme une boîte noire qui renvoie une position sur le bus Ivy. Cependant, tout autre GPS peut être utilisé à la place d’Angéo. Pour cela, il suffit d’écrire un agent Ivy ad-hoc qui envoie les trames NMEA brutes sur le bus Ivy sous la forme d’un message portant le label « POS ». Les arguments non renseignés peuvent être laissés vides.

Afin d’exploiter convenablement le positionnement offert par Angéo dans NAVIG, le boîtier doit être placé sur la hanche de l’utilisateur, et le récepteur accroché à l’épaule. Une

3. <http://www.angeo.fr/>

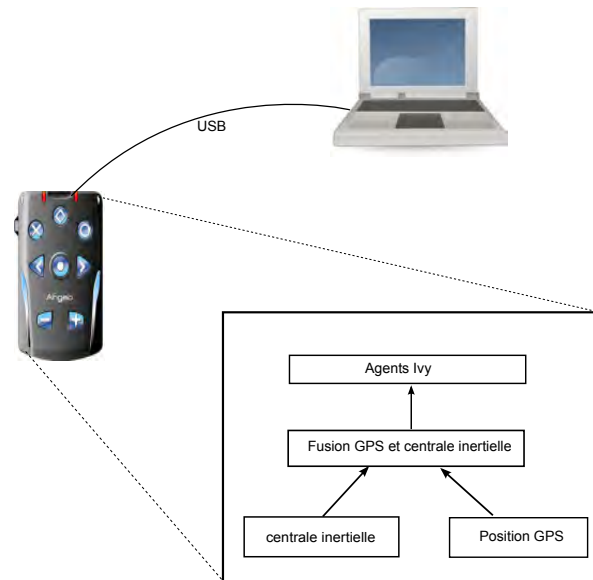


FIGURE 3.6 – L'utilisation du boîtier Angéo dans le système NAVIG. Angéo est un boîtier fonctionnant sous Unix et compatible Ivy.

procédure de calibrage est nécessaire au lancement pour pouvoir utiliser convenablement la centrale inertielle interne au boîtier.

Les messages émis par Angéo sur le bus Ivy se présentent comme suit :

——— Message envoyé par Angéo ———

```

POS type=pos temps=142643 lat=43.604330 long=1.442951 alt=151 vitesse=2.3
cap=67 pPos=2 pCap=3 mode=3
  
```

Les différents champs contenus dans un message Angéo sont décrits dans le Tableau 3.2.

Les différents champs contenus dans un message Angéo sont décrits dans le Tableau 3.2.

Les latitudes et longitudes sont données en degrés décimaux avec 6 décimales. Une latitude est positive au nord de l'équateur, négative au sud. Une longitude est positive à l'est du méridien de Greenwich, négative à l'ouest. L'altitude est donnée en mètres, sans décimale. En théorie, elle peut être négative en certains points du globe. La valeur du paramètre Ppos définit la précision de la position comme elle a été estimée par le boîtier Angéo. Le Tableau 3.3 présente le détail des cas possibles. Idem pour le paramètre Pcap qui décrit la précision du cap renvoyé, les différents cas possibles sont présentés dans le Tableau 3.4. Angéo fonctionne selon différents modes décrits dans le Tableau 3.5.

Ces différents indicateurs sont envoyés par le boîtier à chaque message et sont utilisés par le système NAVIG, et particulièrement par le moteur de fusion. Le choix d'Ivy comme outil de communication s'est révélé judicieux. En effet Angéo avait accumulé un retard qui nous a poussés à trouver une alternative en attendant la livraison. Nous avons donc développé un agent Ivy-GPS qui, grâce à une connexion Bluetooth sur un port série, récupère les trames brutes de tout type de GPS et les envoie sur le bus réseau en respectant la nomenclature définie pour les messages POS. Cette solution nous a permis d'avancer dans nos travaux sans être bloqué pendant l'attente du boîtier Angéo.

TABLE 3.2 – Description des différents champs du message envoyé par Angéo sur le bus Ivy

N° Champs	Nom	Description	Format
1	POS	Nom de l'agent émetteur	Texte
2	Type	Type « POS » issu de l'agent Angéo	Texte
3	temps	Heure locale de la position remontée	Décimal signé
4	lat	Latitude en degrés décimaux	Décimal signé
5	long	Longitude en degrés décimaux	Entier signé
6	alt	Altitude en mètres	Décimal non signé
7	vitesse	Vitesse de déplacement instantanée en km.h-1	Décimal non signé
8	cap	Cap en degrés	Entier non signé
9	Ppos	Indice de précision de la position fournie	Entier
10	Pcap	Indice de précision du cap fourni	Entier
11	mode	Mode de fonctionnement du système	Entier

TABLE 3.3 – Précision de positionnement

Valeur	signification
1	Précision à moins de 3 m
2	Précision entre 3m et 5m
3	Précision entre 5m et 8m
4	Précision entre 8m et 12m
5	Précision moins bonne que 12 m

TABLE 3.4 – Précision du Cap

Valeur	signification
1	Précision à moins de 5°
2	Précision entre 5 et 15°
3	Précision moins bonne que 15

TABLE 3.5 – Les différents modes de fonctionnement du module Angéo.

Valeur	signification
0	Agent inactif
1	Agent en acquisition de données (durant l'initialisation ou en cas de reset)
2	Position calculée par le récepteur GPS seul
3	Position Angéo GPS raw (traitement des données brutes)
4	Position Angéo mode ESTIME (capteurs seuls)
5	Position Angéo HYBRIDE (GPS raw + capteurs)
9	Système hors service

3.4.2 Positionnement par vision artificielle

Comme décrit dans le chapitre 2, la vision par ordinateur est parmi les techniques de positionnement les plus prometteuses. Le module de vision artificielle du système NAVIG est conçu pour reconnaître des objets de l'environnement puis estimer la position relative entre utilisateur et l'objet détecté. La reconnaissance de cibles visuelles dans une image 2D repose sur l'utilisation d'un moteur de reconnaissance supervisé appelé « Spikenet ». En effet nous avons choisi, au début de projet, une approche de reconnaissance sans marquages préalables de l'environnement (e.g. pas de tags visuels spécifiques apposés dans l'environnement). Cependant, il s'agit d'un algorithme de reconnaissance supervisé qui nécessite une phase d'apprentissage pour pouvoir reconnaître des objets dans l'environnement. Les coordonnées 3D de l'objet reconnu sont calculées par une mise en correspondance des deux images de la caméra. Ceci permet de déduire la position relative de l'utilisateur par rapport à l'objet reconnu. Si l'objet est géo-référencé, il est alors possible d'estimer la position absolue de l'utilisateur dans le référentiel terrestre. Ces objets doivent être répertoriés au préalable dans la base de données géographique et étiquetés comme cibles visuelles. La conception et l'implémentation du module de vision artificielle a été commencé par Florian Dramas [Dramas *et al.* 2010] et fait l'objet de la thèse d'Adrien Brillhault sous la direction de C. Jouffrais, IRIT et S. Thorpe, CeRCO et Spiknet, Technologies. Toutefois, j'ai activement participé aux différentes phases de spécifications, ainsi qu'à la définition des protocoles de communication ainsi que dans la collecte de données et dans les évaluations.

3.4.2.1 Reconnaissance de cibles dans l'environnement

L'algorithme de reconnaissance SpikeNet est issu de la recherche en neurosciences et plus spécifiquement sur les mécanismes cérébraux impliqués dans l'analyse extrêmement rapide des scènes visuelles chez les humains. Les résultats de ces travaux ont donné naissance à un noyau de reconnaissance d'objets (SpikeNet). Le système d'analyse d'images SpikeNet permet de localiser et de reconnaître en temps réel des objets présents dans un flux vidéo. Spiknet est maintenant commercialisé sous forme d'une librairie par Spiknet technologies, une start-up toulousaine partenaire dans le projet NAVIG. L'algorithme de détection SpikeNet présente l'avantage d'être particulièrement rapide, robuste à l'orientation, aux variations de contraste ou de luminosité (voir figure 3.7).

En pratique l'algorithme Spiknet est un algorithme semi-supervisé qui nécessite l'apprentissage des objets recherchés. Cet apprentissage se fait par le biais des modèles d'une

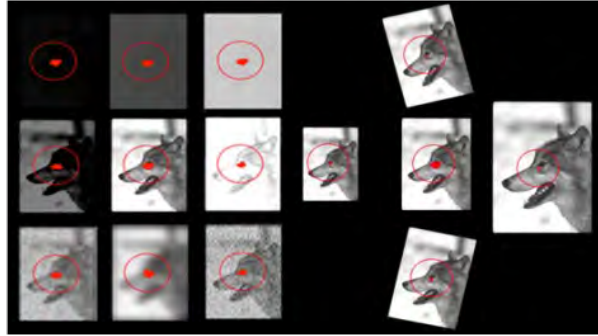


FIGURE 3.7 – Les performances du moteur de reconnaissance Spiknet, particulièrement robuste à l’orientation, aux variations de contraste ou de luminosité.

taille optimale d’environ 30x30 pixels afin de disposer d’information suffisamment sélective sur l’objet. Pour chaque objet recherché, un ou plusieurs modèles doivent être créés et sauvegardés à l’avance. A chaque objet est également une distance d’activation. Cette distance correspond à la distance à partir de laquelle l’objet ne peut plus être détecté. Cette distance est estimée par rapport à la taille réelle de l’objet recherché. Ce paramètre permet de charger uniquement les modèles des cibles qui sont dans l’entourage de l’utilisateur et donc d’améliorer les performances de reconnaissance en minimisant le nombre de modèles chargés au même moment.

Les cibles éventuelles doivent être définies au départ. Pour chaque cible un ou plusieurs modèles sont créés manuellement. La création d’un modèle est faite par un logiciel dédié. Pour cela, une première vidéo doit être réalisée avec le même capteur (caméra) pour préserver les caractéristiques intrinsèques de l’image. A l’aide de cette vidéo, nous pouvons sélectionner les objets et créer différents modèles selon plusieurs angles de vues. La taille du modèle ainsi que le seuil de détection sont deux critères qui doivent être pris en considération lors de la création d’un modèle. Ces deux paramètres jouent un rôle important dans la détermination de la distance de détection et la minimisation des fausses détections potentielles. Une fois créés, les modèles sont stockés dans un fichier et chargés manuellement ou dynamiquement selon les besoins. Un objet ne peut être détecté que s’il a déjà un modèle qui lui correspond.

Une étude sur les performances de Spiknet réalisée par Dramas [Dramas 2010] présente quelques recommandations lors du choix des objets à reconnaître par l’algorithme Spiknet afin d’améliorer les performances. Parmi ces recommandations :

- Un modèle ayant une forme géométrique permettant une tolérance à la rotation diminue grandement le temps de traitement. (Un cercle par exemple)
- Un modèle ayant une forme géométrique permettant une tolérance au rapport d’échelle diminue grandement le temps de traitement. (Une croix par exemple)
- Une meilleure tolérance aux fausses détections permet de diminuer fortement le nombre de modèles puisqu’elle rend Spiknet plus tolérant à la rotation et au facteur d’échelle.
- Le temps de traitement d’un modèle dont la taille dans chaque dimension est inférieure à 20% de la taille de l’image rend le temps de traitement rédhibitoire.

Ces recommandations ont été suivies lors de la sélection des objets potentiels.

3.4.2.2 Localisation d'objets dans l'environnement

Afin de localiser un objet dans l'environnement nous utilisons la vision stéréoscopique. Néanmoins, plusieurs autres approches existent comme l'utilisation de la taille apparente de l'objet ou la triangulation. La stéréovision consiste à évaluer le relief de la scène en déterminant la relation géométrique qui lie les deux caméras. Cette relation permet de calculer les coordonnées 3D d'un point lorsqu'il est présent dans le champ des deux caméras simultanément. Nous utilisons le prototype présenté par Dramas [Dramas 2010] dans sa thèse. Il comporte la Bumblebee, produit de la société PointGrey (voir figure 3.8), comme capteur de reconstruction 3D. La Bumblebee comporte deux caméras de marque SONY en niveaux de gris et d'une résolution de 640 x 480 et 48 images par seconde (FPS) pour chacune d'elle. Une lentille de 2,5 mm de focale est placée devant la caméra pour assurer un angle de vue de 100°.

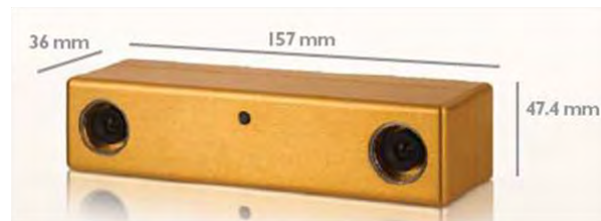


FIGURE 3.8 – Le capteur choisi pour le système de vision artificielle : La Bumblebee.

Le système repose sur la reconstruction 3D de la scène visuelle basée sur la mise en correspondance de tous les pixels dans les images des deux caméras. L'utilisation de la Bumblebee comme capteur nous permet d'avoir une reconstruction 3D efficace, une résolution minimale de 640x480 et un grand angle de vue, d'environ 100°. L'API de la Bumblebee est utilisée pour déterminer la distance entre l'objet recherché et le capteur (la caméra).

Le module de vision embarquée développé utilise la librairie Spikenet pour reconnaître un objet dans la scène (comme décrit précédemment) et la librairie livrée avec la Bumblebee pour la reconstruction 3D. Une interface graphique a été implémentée avec la bibliothèque QT en C++ et permet de suivre en temps réel le fonctionnement du dispositif. Les messages IVY sont envoyés sur le bus lorsqu'un objet est reconnu. Le message se compose ainsi :

————— Message envoyé par SNV en cas d'une reconnaissance —————

SNV <Nom-objet> <X><Y><Z>

Une fois un objet reconnu dans la scène, nous pouvons récupérer son identifiant. Ayant l'identifiant de cet objet, il est possible d'interroger la base de données pour extraire ses coordonnées géographiques.

3.4.2.3 Localisation par vision artificielle

Le positionnement par vision artificielle se base sur les principes de la reconnaissance et la localisation d'objets décrits précédemment. L'idée consiste à créer des modèles de différents objets pouvant être reconnus dans l'environnement comme les enseignes de magasins, les panneaux de signalisations, ou les façades de bâtiments (voir figure 3.9).

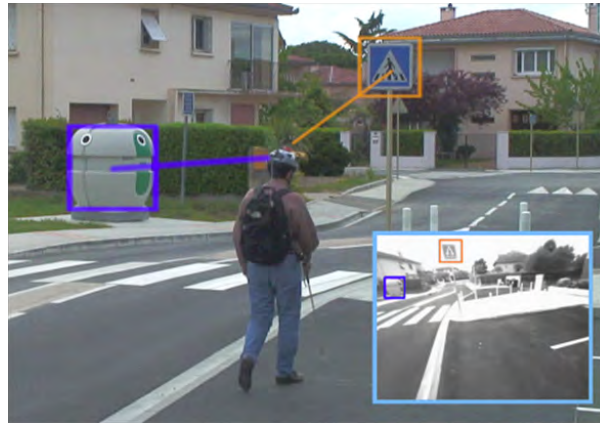


FIGURE 3.9 – Reconnaissance des différentes cibles dans l’environnement.

Ces cibles éventuelles sont répertoriées par leur identifiant, leurs noms et leurs coordonnées géographiques dans la base de données géographique. Le processus de localisation se base sur trois étapes :

- La première étape consiste à reconnaître une cible dans la scène. Les coordonnées 2D de la cible dans l’image sont donc renvoyées par Spiknet. Les coordonnées 3D de la cible dans le repère de la caméra sont estimées par stéréovision. Cette première étape permet de déterminer la distance entre la cible et la caméra.
- Parallèlement à ce traitement et connaissant le nom de la cible reconnue, le module de vision interroge la base de données avec l’identifiant de l’objet pour récupérer ses coordonnées géographiques.
- L’étape suivante consiste à estimer la position globale de l’utilisateur en combinant les coordonnées géographiques de la cible et la distance estimée à celle-ci. Pour cela, il est nécessaire de connaître l’angle (azimut) sous lequel la cible a été reconnue.

La figure 3.10 (gauche) illustre l’intérêt d’avoir un capteur de l’orientation de la tête. Ce capteur est un magnétomètre 3 axes qui renvoie trois valeurs d’angles (yaw, pitch et roll) comme présenté sur la figure 3.10 (droite).

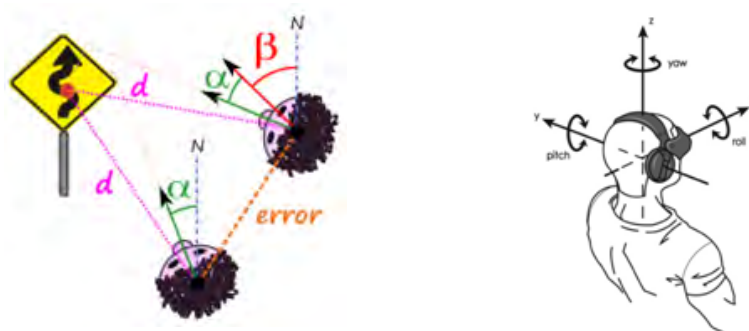


FIGURE 3.10 – Illustration de l’importance du capteur tête pour déterminer la position par vision artificielle.

La figure 3.11, illustre l’impact d’une erreur de l’orientation de la tête. Dans ce cas une erreur de 40° a été introduite pour visualiser l’impact sur le positionnement par vision artificielle.

Afin de valider cette approche nous avons réalisé une première batterie de tests. Le capteur de vision ainsi qu’une centrale inertielle étaient placés sur la tête d’un utilisateur comme présenté dans la figure 3.12. Le but de cette évaluation était de valider que le

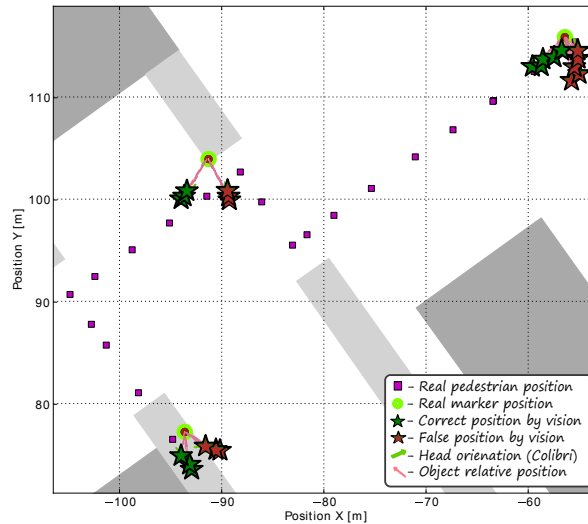


FIGURE 3.11 – L’impact de 40° d’erreur sur la position calculée par le module de vision artificielle.

module de vision renvoie une position calculée correcte en se basant sur la position d’une cible réelle.



FIGURE 3.12 – L’utilisateur embarque le module de positionnement : La bumblebee et la centrale inertielle placée sur la tête ainsi qu’un PC dans le sac à dos.

Dans ce test, un utilisateur était placé devant une cible et à différentes distance (2, 4, 8 et 10 mètres). Pour chacune de ces distances, l’utilisateur faisait des mouvements avec la tête pendant 60 secondes en essayant de regarder la cible avec différents angles et différentes rotations afin d’évaluer la robustesse et la stabilité de la méthode. Dans ces différents tests, la cible à été reconnue en moyenne 1500 fois avec une moyenne de 25 détections par seconde. La figure 3.13 montre que pour 80% des détections, l’erreur constatée est inférieure à 0,5 mètres. Cette erreur peut s’expliquer par trois facteurs :

- Erreurs dans la reconstruction de la carte de profondeur, qui engendre des erreurs de calcul de distance
- Erreurs de détection dues au moteur de reconnaissance Spiknet
- Erreurs dues au capteur d’orientation

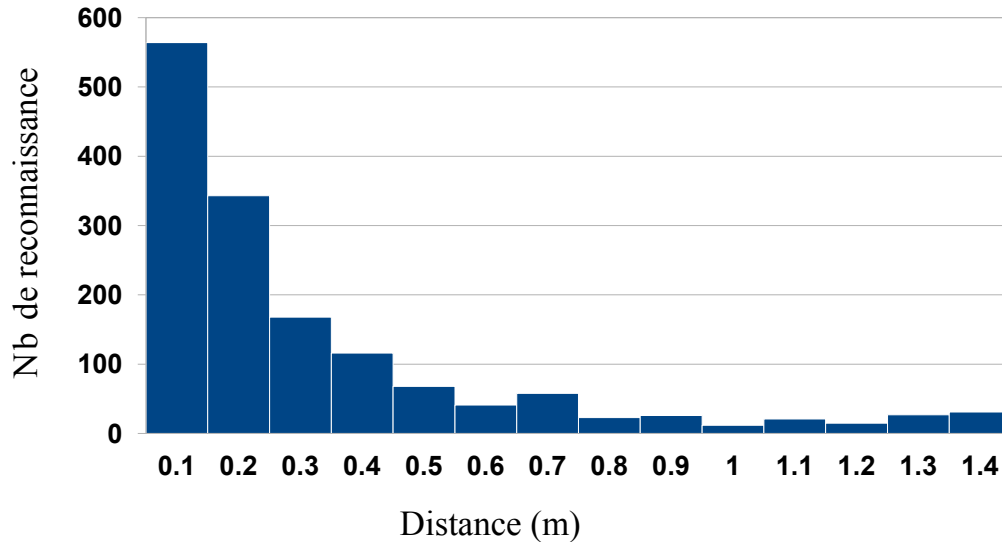


FIGURE 3.13 – Histogramme des erreurs de position renvoyées par le module de vision artificielle. L’erreur correspond à la différence des distances réelles (entre l’utilisateur et l’objet) et estimées (renvoyées par le module de vision).

3.4.3 Fusion entre GPS et Vision artificielle

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d’implémenter un moteur de fusion de données indépendant du module GPS utilisé. Ce choix permet d’utiliser, en entrée, aussi bien un GPS amélioré (comme Angéo) qu’un GPS classique. En attendant la livraison du module ANGEO, nous avons utilisé un récepteur de marque Qstarz GPS⁴. Suite à des tests préliminaires en environnement extérieur, nous avons constaté que le cap fourni par le nouveau GPS n’était pas suffisamment précis car il se base uniquement sur le signal GPS (en effet le cap ne peut alors être estimé que si l’utilisateur est en mouvement). Afin de disposer d’un cap utilisateur plus précis et surtout continu au cours du temps, nous avons décidé d’utiliser une deuxième centrale inertielle placée sur la hanche de l’utilisateur.

L’ensemble des modules qui interviennent dans le module de fusion sont donc :

- Une première centrale inertielle placée sur la tête : il s’agit d’un capteur pour déterminer l’orientation de la tête lors de la détection d’une cible. Cette même centrale est aussi utilisée pour positionner les sons 3D indépendamment de l’orientation de la tête.
- Une deuxième centrale inertielle placée sur la hanche afin de déterminer le cap et la vitesse de l’utilisateur
- SNV : l’agent de reconnaissance d’objets dans une scène
- Le GPS : il permet de retourner la position de l’utilisateur ainsi que sa vitesse de marche approximative.

Tous ces modules disposent d’agents Ivy respectifs afin de renvoyer les données sur le bus. Plusieurs pré-tests unitaires avec ces différents modules ont montré des résultats assez divergents avec des signaux parfois extrêmement bruités. A titre d’exemple, nous avons observé des erreurs de mesures du capteur à la hanche en raison du bruit généré par les pas lors du déplacement, des fausses détections par le module de vision Spikenet, des imprécisions dans la mesure d’orientation de la tête très pénalisantes lors du calcul de la

4. <http://www.qstarz.com/Products/GPS%20Products/BT-Q1000.html>

position de l'utilisateur par vision, etc. Nous avons alors choisi de séparer le processus de fusion en deux phases :

- Phase de pré-calcul et d'initialisation de contraintes : il s'agit d'appliquer un premier filtrage sur les données issues des deux centrales inertielles (en effet il s'agit des deux sources de données les plus bruitées) et de définir des limites au comportement du marcheur.
- Phase de fusion, en combinant la position GPS, la position issue de la vision et du modèle de marche, pour calculer une position consolidée. L'architecture globale du module de fusion est représentée par la figure 3.14.

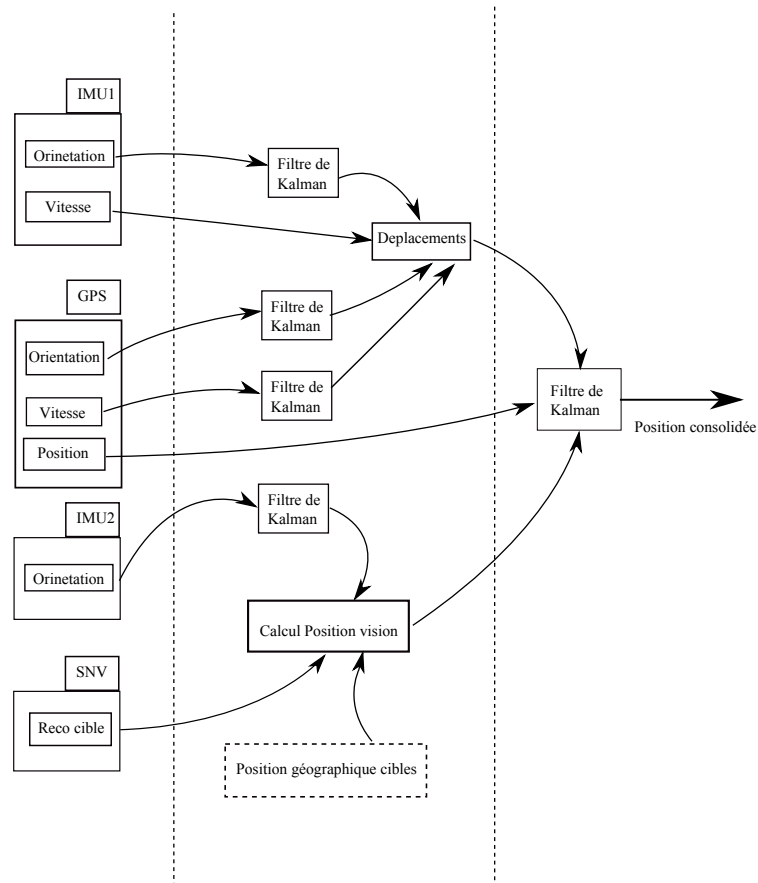


FIGURE 3.14 – Architecture du module de fusion avec les deux phases.

La présentation détaillée des différentes fonctions du module de fusion est disponible dans un rapport de stage [Borovec 2011] réalisé dans le cadre du projet NAVIG. Toutes les méthodes utilisées et les données recueillies sont en cours de publication. L'implémentation du module de fusion a été réalisée en langage python. Plusieurs modules d'affichage et d'analyse ont été développés par J. Borovec. Le module de fusion a été testé dans deux environnements différents. Dans la suite nous allons présenter les détails de la méthode suivie, ainsi que les résultats les plus pertinents.

3.4.4 Résultats préliminaires du moteur de fusion

Afin d'illustrer les performances du moteur de fusion, plusieurs tests ont été menés dans différents environnements. Les données issues des différents capteurs embarqués (GPS, capteur de la position de la tête, capteur dédié au cap, et les reconnaissances Spikenet) sont enregistrées dans un fichier lors du déplacement de l'utilisateur. Elles sont rejouées

et fusionnées offline. Pour le moment, ce choix s'explique par la nécessité de supprimer les fausses détections du fichier enregistré d'un côté, et d'optimiser l'algorithme (fiabilité et rapidité) de la fusion. Dans la version actuelle, l'algorithme de fusion est trop lent pour autoriser une fusion online. Les travaux sur cet algorithme sont encore :

- Une fausse détection signifie qu'un objet a été détecté alors qu'il n'est pas présent dans la scène. Les fausses détections ont un impact important car elles génèrent un mauvais positionnement par le module vision et donc une grande erreur dans la position fusionnée. Dans un premier temps nous avons décidé de supprimer manuellement les lignes qui correspondent à des fausses détections pour travailler spécifiquement sur l'algorithme de fusion.
- Optimisation de la fiabilité de l'algorithme de fusion par ajustement successif des paramètres de filtrage et des pondérations.

A noter qu'au moment où nous écrivons ce manuscrit, les travaux concernant le moteur de fusion ne sont pas totalement terminés.

Nous présentons ici la collecte de deux jeux de données permettant la mise en évidence des performances du moteur de fusion. Ce recueil de données a été réalisé dans deux environnements différents. Les deux itinéraires choisis sont composés de sections de différentes longueurs avec des traversées de route. Une partie des deux itinéraires est considérée comme difficile, voire impossible, pour un GPS seul (sous un préau, à coté de hauts bâtiments). L'idée est d'avoir deux itinéraires assez représentatifs et qui présentent plusieurs difficultés pour le positionnement.

Le trajet #1 est situé dans le campus de l'université, il fait au total 380 mètres. 11 cibles potentielles pour la vision ont été placées. Ces cibles étaient des panneaux de 80 cm X 60 cm. Sur chaque tableau un caractère alphabétique a été écrit. Ces panneaux ont été accrochés à une hauteur de 2 mètres et disposés sur l'itinéraire à une distance de 30 mètres l'un de l'autre minimum comme présenté par la figure 3.15 (cercles verts). Pour chaque cible, plusieurs modèles ont été créés manuellement et selon plusieurs angles, puis stockés dans un fichier. Pour chaque cible nous avons défini une distance d'activation (distance à laquelle les modèles doivent être chargés) qui correspond à la distance à partir de laquelle la cible est susceptible d'être détectée (en fonction de sa taille). Les cibles potentielles ont aussi été ajoutées à la base de données géographique et étiquetées comme des points visuels PV (voir section 3.5.1.1). En collaboration avec le service de topographie de l'université nous avons pu relever leurs positions géographiques avec précision. Pour les besoins de l'évaluation, et dans le but de récupérer la position réelle de l'utilisateur, un marquage spécial au sol a été réalisé : 86 points ont été marqués avec une distance de 4,5 mètres entre deux points. Nous avons ainsi pu récupérer la position réelle de l'utilisateur par le biais d'un agent nommé « key ». A chaque passage sur un point marqué au sol, la position réelle est envoyée sur le bus Ivy (grâce à un appui clavier) et enregistrée dans un fichier. La figure 3.15 représente cet itinéraire.

Une partie de l'itinéraire #1 est situé en dessous d'un préau, alors que le reste de l'itinéraire est dans une zone dégagée. L'itinéraire contient donc une difficulté particulière pour le GPS. Plusieurs relevés réalisés avec un GPS seul ont montré une faible précision voire une absence de positionnement GPS dans cette section de l'itinéraire. La figure 3.16 montre une trace de la position estimée uniquement par le GPS.

Après optimisation de l'algorithme grâce aux différents jeux de données enregistrés, un trajet a été réalisé avec le système NAVIG complet (sans guidage). L'expérimentateur a été équipé avec l'ensemble des capteurs nécessaires à la fusion. Les différents messages circulant sur le bus Ivy ont été enregistrés dans un fichier au cours du test. La figure 3.17 représente la trace enregistrée.

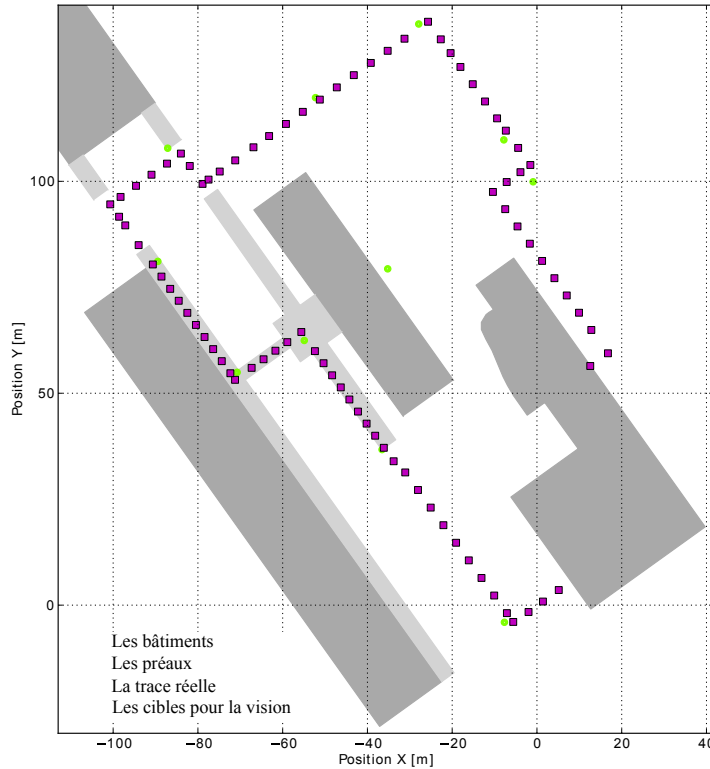


FIGURE 3.15 – L’itinéraire #1 défini dans le campus de l’université. Les losanges représentent les points marqués au sol tous les 4,5m. L’expérimentateur, équipé avec le prototype NAVIG, doit suivre ces points pour recueillir plusieurs jeux de données successifs.

Bien que nous n’ayons pas encore réalisé d’évaluations systématiques, il semble que le module de fusion améliore considérablement le positionnement. En effet, sur les deux parties de l’itinéraire, sous le préau et en zones dégagées, la trace résultante de la fusion (ici avec des cercles bleus) est très proche du trajet réel alors que la trace du GPS seul (ici avec des losanges jaunes) est beaucoup plus éloignée.

Dans ce qui suit nous présentons une analyse détaillée du graphe présent dans la figure 3.17.

Pour la zone dégagée. Dans cette partie du trajet, que se soit au début ou à la fin de l’itinéraire, nous pouvons remarquer que la trace GPS seule présente un certain décalage par rapport à la position réelle. Ce décalage s’atténue au milieu puis reprend à la fin de l’itinéraire. Ce décalage s’explique par la présence de bâtiments qui réfléchissent les signaux GPS et diminuent la précision. Sur cette même partie du trajet, nous pouvons constater que la trace résultante du moteur de fusion est plus précise. Lors de la détection d’une cible, nous remarquons que la trace estimée s’accorde parfaitement avec la position réelle. Entre deux détections de cibles visuelles, la dérive GPS est également atténuée par les informations provenant de la centrale inertielle placée sur la hanche. Cette dernière permet d’intégrer les changements de direction et de vitesse de l’utilisateur.

La partie sous le préau. Partie sous le préau : L’apport de la vision est primordial pour cette partie du trajet puisque les signaux GPS y sont fortement occultés. Cette partie comporte 2 changements de directions, et fait au total une centaine de mètres, ce

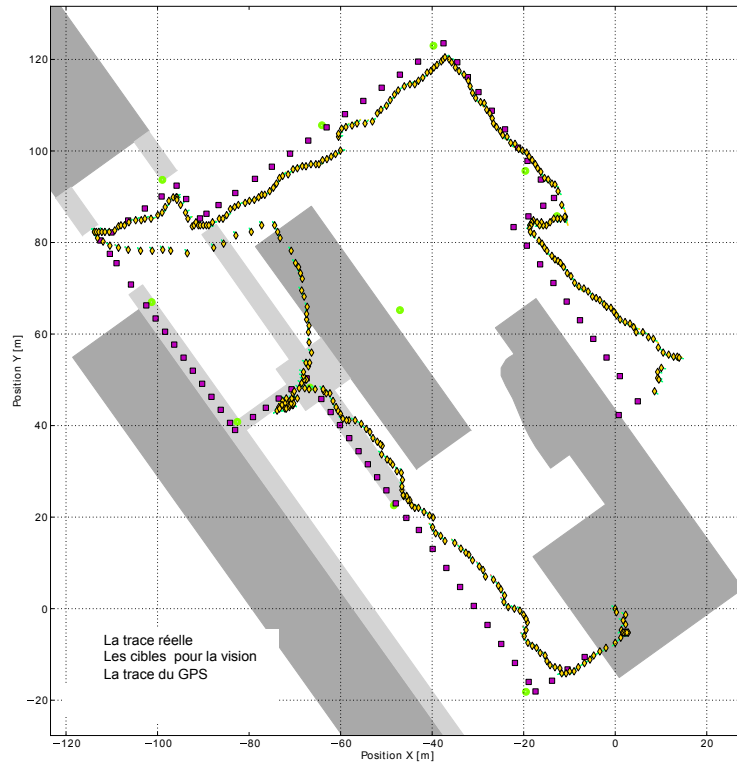


FIGURE 3.16 – Illustration du positionnement GPS seul sur l'itinéraire #1. Alors que le positionnement est relativement correct en terrain dégagé, il dérive fortement en dessous du préau.

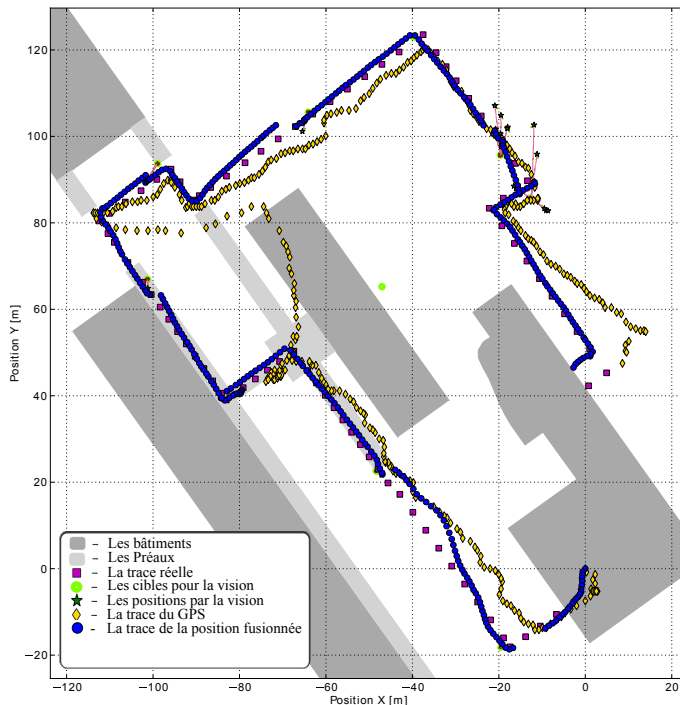


FIGURE 3.17 – Représentations du trajet #1. Trace du GPS en jaune et de la position fusionnée en bleu.

qui rend difficile une navigation à l'estime qui s'appuierait uniquement sur la centrale inertielle. Sur cette partie du trajet, il est clair que la détection d'objets géolocalisés par

le module vision permet d'améliorer grandement la localisation. On peut voir sur la figure 3.17 que la trace est assez proche de l'itinéraire réel malgré l'absence de signaux GPS.

Le trajet #2 est situé au centre-ville de Toulouse. Il fait au total 660 mètres et est bordé de bâtiments assez élevés. 63 cibles potentielles pour la vision ont été choisies parmi les enseignes des magasins, les panneaux de signalisation et les façades des bâtiments. Les modèles relatifs à chaque cible ont été créés manuellement et stockés dans le fichier modèle. Pour chaque cible nous avons défini une distance d'activation qui correspond à la distance à partir de laquelle ses modèles doivent être chargés. La figure 3.18 représente cet itinéraire. Comme pour le trajet #1, nous avons défini un itinéraire à respecter afin de créer le jeu de données. 75 points ont été identifiés avec une distance de 8.8 mètres entre chaque deux points. Chaque point avait un identifiant unique et une position géographique précise. Comme précédemment, l'expérimentateur était équipé avec le prototype NAVIG puis envoyé sur l'itinéraire. Toutes les données étaient enregistrées dans un fichier.

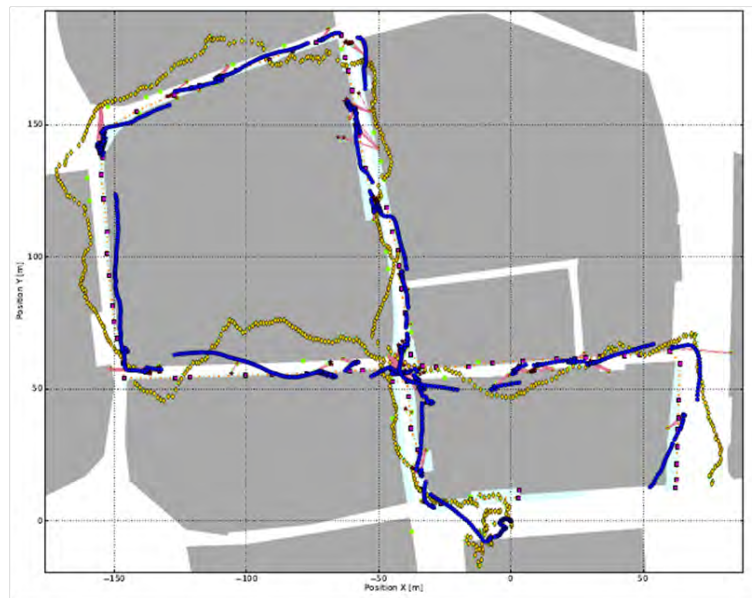


FIGURE 3.18 – Représentation du trajet #2. Trace issue du GPS seul en jaune et du moteur de fusion en bleu.

Les mêmes observations que celles effectuées lors du trajet #1 peuvent être faites sur le trajet #2. Dans ce cas, il n'y avait pas de partie sous un préau mais la totalité du trajet était dans un environnement urbain dense où l'effet de réflexion des signaux était plus important.

Comme présenté dans la figure 3.18, l'itinéraire réellement réalisé est représenté par les losanges. La trace GPS seul est représentée avec la couleur jaune. Nous pouvons voir clairement qu'en utilisant la fusion (trace en bleu) le positionnement est plus précis et dérive moins. Nous pensons que rajouter une couche de traitement (map-matching) avec les trottoirs pourrait améliorer considérablement le résultat final surtout que dans ce cas nous pouvons clairement voir qu'avec la fusion on observe toujours la trace du bon côté du trottoir, contrairement à la trace GPS seule.

Dans ce test, les cibles utilisées étaient des cibles naturelles contrairement au trajet #1, ce qui met en évidence l'intérêt de notre approche de fusion qui ne nécessite pas un équipement particulier de l'environnement.

3.4.5 Discussion

L'assistance à la navigation pédestre présente un problème un peu différent et quelques défis supplémentaires par rapport à l'assistance au déplacement d'un robot ou d'une voiture. Les différences peuvent être résumées dans les points suivants :

- Les déplacements d'un robot peuvent être entièrement contrôlés et sont prévisibles. Ce n'est pas le cas des piétons à qui on peut proposer des itinéraires ou donner des instructions mais qui ne sont pas contraints de les suivre.
- Le mouvement humain est assez imprédictible et difficile à modéliser, que ce soit pour un sujet donné ou dans le cadre d'une généralisation d'une personne à une autre.

Le GPS est le moyen de positionnement le plus utilisé, que ce soit dans des systèmes commercialisés ou des projets de recherche. C'est donc, à ce jour, le principal moyen utilisé pour estimer la position d'un utilisateur. Plusieurs travaux s'accordent sur le fait que la relative imprécision de ces systèmes les rend inutilisables dans leur configuration actuelle pour le positionnement piéton.

Une première amélioration peut se faire en rajoutant une centrale inertielle [Langer & Kiesel 2012]. Le rôle de la centrale est d'assurer une navigation à l'estime. Couplée à un GPS, une centrale inertielle peut estimer pendant quelques secondes ou dizaines de secondes une position précise en intégrant dans le temps les déplacements par rapport à la dernière position connue. Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un prototype basé sur un GPS issu du commerce et une centrale inertielle qui se porte à la hanche. Ce prototype a été utilisé avec succès dans le module de fusion.

Un résultat important est que nous pouvons utiliser des amers géolocalisés pour améliorer le positionnement des déficients visuels. La base de données géographique joue un rôle important dans ce processus. En effet les cibles éventuelles doivent être stockées dans le SIG avec leurs coordonnées géographiques. Nous avons réussi à montrer qu'il est possible d'améliorer considérablement l'estimation de la position grâce à la présence d'un petit nombre d'amers sur le parcours. Cependant, l'utilisation de la vision embarquée pour améliorer le positionnement n'est pas une approche nouvelle. Plusieurs travaux [Sylvie Treuillet *et al.* 2007], [Treuillet & Royer 2010], [Oskiper *et al.* 2012] ont déjà utilisé la vision par ordinateur pour améliorer le positionnement. Ces travaux ont tous utilisé la vision monoculaire. Notre travail se distingue par l'utilisation de la vision stéréoscopique et l'utilisation de l'approche par localisation de cibles visuelles. Bien que cette approche ait prouvé son intérêt, sa faisabilité reste dépendante de plusieurs points importants :

- Pour l'instant, il est compliqué d'utiliser des optiques différentes pour la création de modèles (a priori) et la détection (lors du déplacement).
- La robustesse au changement de luminosité. En effet, pour maximiser les chances d'avoir des détections, celles-ci doivent être réalisées dans des conditions d'illumination proches de celles correspondant à la création des modèles.
- La création manuelle de modèles est une opération fastidieuse, qui nécessite beaucoup de temps. Lors de la création d'un modèle, les seuils de détection et la taille du modèle doivent être fixés judicieusement.
- Le temps de traitement de SpikeNet croît avec le nombre de modèles chargés en même temps. Pour remédier à ce problème, nous utilisons le chargement/ déchargement automatique des modèles. Ce processus permet à SpikeNet, selon la position de l'utilisateur, de charger uniquement les cibles potentiellement visibles.
- L'utilisation de cibles naturelles, bien qu'avantageuse (pas de nécessité d'équiper l'environnement), présente quelques limites comme la similarité des panneaux de

signalisation ou des différentes façades qui peut conduire à des fausses détections.

Il est toujours intéressant d'utiliser d'autres algorithmes de reconnaissance de forme comme SIFT ou SURF. Ces algorithmes sont assez robustes aux changements de luminosité, aux rotations et aux changements d'échelles. Cependant ils nécessitent un temps de traitement plus long que SpikeNet. Le travail d'optimisation de la vision dans ce contexte est actuellement sous la responsabilité d'Adrien Brilhault (travail de doctorat co-dirigé par C. Jouffrais (IRIT) et S. Thorpe (CerCo et Spikenet Technology)).

3.5 Un système d'information géographique adapté

Le système d'informations géographiques présente l'unique source d'informations permettant à un déficient visuel, utilisant un système d'aide à la navigation, de calculer un itinéraire et d'obtenir des informations sur l'environnement dans lequel il évolue. L'état de l'art sur les SIG montre qu'il n'existe pas de bases de données géographiques adaptées aux besoins des piétons et plus spécifiquement aux non voyants, tout comme il n'existe pas d'outils spécifiques pour exploiter ces données. Afin d'améliorer l'utilisation des SIG dans les systèmes d'aide à la navigation, nous pensons que le travail doit s'appliquer aux deux composants principaux, d'un côté la base de données géographiques et de l'autre côté le moteur cartographique.

3.5.1 La base de données

Adapter le SIG pour qu'il serve de support à un déplacement piéton, qui plus est à un piéton déficient visuel, passe tout d'abord par une adaptation de la base de données utilisée dans ce SIG. Nous distinguerons par 3 éléments :

- La classification des données
- Le stockage des données
- La collecte des données

3.5.1.1 Classification des données

Dès les premières phases de conception, il convient d'avoir une véritable réflexion sur une classification des différents objets existant dans le SIG. L'organisation des données géographiques dans la base de données est un élément déterminant pour faciliter leur extraction et exploitation par le système d'aide à la navigation. Afin de répondre à cette question, nous avons organisé des réunions de discussion avec les non-voyants, et des éducateurs en locomotion partenaires du projet. Nous nous sommes aussi inspirés de l'état de l'art et des différentes classifications existantes. Nous avons pu dégager une classification des différents objets à stocker dans la base qui correspond, d'une part, aux besoins des utilisateurs en termes de sécurité, localisation, orientation et information et, d'autre part, aux besoins du système (pour le calcul d'itinéraire et le guidage). Cette classification comprend 4 classes d'objets organisées selon leur signification potentielle et non pas selon leur type. Un même objet peut donc avoir plusieurs significations selon le trajet effectué.

Chemins piétons. Ils englobent toutes les aires utilisables par un piéton, il s'agit des trottoirs, des passages piétons et de toutes les infrastructures qui peuvent servir comme passage pour un piéton en toute sécurité.

Point de Repère (PR). Ces points ont une valeur de repère pour les non-voyants. Ils doivent pouvoir être détectés par une autre modalité sensorielle que la vision (indices tactiles, proprioceptifs, olfactifs ou auditifs). Étant donné que les GPS ne sont pas toujours fiables, la détection d'un de ces points par l'utilisateur lui permet (si le point a préalablement été annoncé) de confirmer sa propre position ou de prendre la meilleure décision le long de l'itinéraire. Dans l'hypothèse où les PR sont suffisamment nombreux, un non-voyant ayant préparé son itinéraire aurait la possibilité de ne pas utiliser le système d'assistance au guidage pendant le trajet, tout en ayant régulièrement des confirmations sur sa position. Les PR sont divisés en quatre sous-catégories :

- Tactile : les éléments que l'utilisateur peut repérer avec la canne ou avec les pieds. (ex : un changement de revêtement du sol, des plots en bétons, etc.) ;
- Proprioceptif : les éléments repérables grâce à la perception de son propre mouvement et de son orientation par rapport à la verticale (ex : rue qui descend, etc.) ;
- Sonore : les éléments que l'utilisateur peut entendre de façon naturelle (ex : une fontaine, un jardin, un grand espace, etc.) ;
- Olfactif : les éléments que l'utilisateur peut sentir (ex : une boulangerie, un espace vert, etc.).

Notons que la disponibilité de ces indices est utilisée dans les formations en locomotion. La convergence de plusieurs de ces indices leur confère une valeur plus importante (notion de preuve).

Point d'Intérêt (POI). Comme dans tous les systèmes GPS, ces points représentent les lieux ayant un intérêt potentiel pour l'utilisateur. En plus de l'avertir sur la proximité de lieux utiles, ils lui permettent, lorsqu'ils sont décrits et localisés, de comprendre l'environnement dans lequel il se déplace. Ces points sont extraits du SIG où ils sont stockés accompagnés de métadonnées comprenant un nom de sous-catégorie (ex : commerce alimentaire) et une description détaillée (boulangerie + nom de la boulangerie). Dans un premier temps, nous avons défini sept sous-catégories de POI comme suit :

- Restauration
- Hôtellerie
- Commerces divers
- Commerces alimentaires
- Services
- Sport/Loisir
- Tourisme

Point de Vision (PV). Cette quatrième classe est spécifique au système NAVIG. Ce sont des points d'ancrage visuel, potentiellement détectables par le système de vision artificielle embarquée (SNV) pour améliorer la précision du positionnement (panneaux, enseignes de magasins ou mêmes façades de bâtiments). Ces points sont géolocalisés dans le SIG.

Ces différents points doivent être étiquetés dans le SIG au préalable. Un objet peut avoir plusieurs types. Une boîte aux lettres par exemple peut servir comme ancre visuelle si elle est située sur un trajet ou bien comme une cible finale si l'utilisateur souhaite poster une lettre.

Les deux classes suivantes sont deux classes supplémentaires qui doivent aussi être considérées dans la classification, bien qu'elles ne soient pas taguées dans la base de données. Elles sont traitées différemment lors du guidage selon le degré d'expertise en locomotion de l'utilisateur (novice, médium ou expert) ou le mode de guidage utilisé.

Point Difficile (PDF). Ils correspondent aux traversées, aux intersections ou carrefours ainsi qu'à tous les passages du trajet qui peuvent être considérés comme problématiques pour les non-voyants et dont l'utilisateur doit être informé de façon spécifique. Ils ont pour fonction d'alerter l'utilisateur.

Point Favori (PF). Il s'agit des POI personnels de l'utilisateur. L'utilisateur peut les ajouter dans le SIG au cours de ses trajets par l'intermédiaire d'un bouton ou d'une commande vocale spécifique. L'utilisateur a la possibilité de définir plusieurs catégories de PF, comme par exemple « professionnel » ou « personnel ».

Afin de gérer ces classes d'objets, nous avons proposé un modèle de données adapté. Dans la suite nous présentons en détail l'architecture proposée.

3.5.1.2 Stockage des données

Le stockage des diverses informations géographiques nécessite une structure de base de données adaptée. Ainsi les informations géographiques nécessaires (nom, latitude, longitude, largeur, hauteur) sont stockées dans différentes tables. Chaque table est propre à une classe d'objets spécifique et est définie avec plusieurs champs. Dans ce qui suit nous allons présenter les principales tables ainsi que le dictionnaire de données de chaque table.

La table Lieu (tableau 3.6) est utilisée pour stocker l'ensemble des noms de lieux (rue, place, etc.).

TABLE 3.6 – Dictionnaire de données de la table Lieu

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDLieu	Entier	-	Identifiant unique
szNomCommune	Chaîne de caractères	Max 255	-
szNomLieu	Chaîne de caractères	Max 255	-
nIDLieu	Entier	Identifiant unique système	-

La table TypeArc (Tableau 3.7) liste l'ensemble des caractéristiques d'arcs gérés par le système. Elle permet entre autre de pondérer un type d'Arc particulier. Cette pondération sera utilisée ultérieurement dans la sélection de l'itinéraire. Suite aux réunions menées avec les participants et les instructeurs en orientation et mobilité (O&M), les différents types qui peuvent être intéressants à lister sont présentés dans le Tableau 3.8. Cependant, il est simple de rajouter un nouveau type avec une requête d'insertion.

La table Nœuds (tableau 3.9) liste les points de jointures entre les arcs. Ces nœuds correspondent aussi aux points de réorientations.

La table TypeRevetement (tableau 3.10) liste les types de revêtements au sol. Tout comme les données de la table TypeArc, les informations contenues dans cette table sont prises en compte dans les préférences de l'utilisateur pour le calcul d'itinéraire. Différents types de revêtement ont été considérés et répertoriés suite aux réunions de conception participative comme présenté dans le tableau 3.14.

La table TypeLargeur (tableau 3.13) : Cette table permet de hiérarchiser les différentes largeurs d'arc. Tout comme les données de la table typeArc ou TypeRevetement, cette table contient des informations permettant de gérer les préférences utilisateur pour adapter le calcul d'itinéraire. Comme présenté dans les résultats de différentes réunions, la largeur d'un trottoir ou d'un chemin peut être un facteur déterminant lors du choix d'un itinéraire.

TABLE 3.7 – Dictionnaire de données de la table TypeArc

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDTypeArc	Entier	-	Identifiant unique système
szCodeTypeArc	Chaîne de caractères	3 caractères	Codification unique alphanumérique du type d'arc
szNomTypeArc	Chaîne de caractères	Max 255	Description du type d'arc
fTypeArcPondCout	Réel	Entre 1 et 2	Facteur de pondération affecté au type d'arc lors d'un calcul d'itinéraire

TABLE 3.8 – Les différents types d'arcs que nous avons recensés et qui sont stockés dans la base de données

Type arc	Code	Type arc	Code
RTE	route	TRA	traversée de route sans passage piéton
TRT	trottoir	VPI	voie piétonne
PPI	passage piéton	PPF	passage piéton avec feux tricolore
ESC	escalier	PAN	passage à niveau
TUN	tunnel		

TABLE 3.9 – Dictionnaire de données de la table Noeud

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDNoeud	Entier	-	Identifiant unique système
GeoPoint	Chaîne de caractères	Max 255	Données géométrique du point au format WKT
fAltitude_m	Réel	-	-

TABLE 3.10 – Les différents types de revêtements recensés et stockés dans la table Arc.

Type arc	Code	Type arc	Code
GOU	Goudron	BET	Béton
PAV	Pavé	CAR	Carrelage
BOI	Bois	PEL	Pelouse

TABLE 3.11 – Dictionnaire de données de la table TypeRevetement.

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDTypeRevetement	Entier	-	Identifiant unique système
szCodeTypeRevetement	Chaîne de caractères	3 caractères	Codification unique alphanumérique du type de revêtement
szNomTypeRevetement	Chaîne de caractères	Max 255	Description du type de revêtement
fTypeRevetementPondCout	Réel	Entre 1 et 2	Facteur de pondération affecté au type de revêtement lors d'un calcul d'itinéraire

Différentes valeurs de largeurs ont été proposées. Avec les instructeurs en O&M nous avons défini 5 classes comme décrit par le tableau 3.12.

TABLE 3.12 – Les différentes largeurs considérer important et qui ont été proposées lors de l'analyse.

Type arc	Code	Type arc	Code
LTE	Largeur très étroite (<1m)	LL	LL Largeur large (entre 4 et 8m)
LE	Largeur étroite (entre 1 et 2m)	LXL	Largeur très large (>8m)
LM	Largeur moyenne (entre 2 et 4m)		

La table TbArcs (tableau 3.14) contient l'ensemble des arcs de la base de données. Un arc relie 2 nœuds entre eux et possède une position spécifique. Il appartient à un lieu, possède un type d'arc, un type de revêtement et un type de largeur, et intègre aussi dans certains cas la numérotation de la rue. Sa structure est la suivante :

La TbPoint (tableau 3.15) regroupe la localisation et la description de tous les points remarquables utilisés par le système. Sa structure est la suivante :

La table TbPolygone (tableau 3.16) contient tous les objets de type polygone comme les bâtiments, les commerces ou les parcs.

Le modèle conceptuel de données qui fait intervenir l'ensemble des tables décrites précédemment est présenté dans la figure 3.19.

Les données sont stockées dans une base de données SQLite . Il s'agit d'une bibliothèque écrite en langage C qui propose un moteur de base de données relationnelle accessible par le langage SQL. Contrairement aux serveurs de bases de données traditionnels, comme MySQL ou PostgreSQL, la particularité de SQLite est de ne pas reproduire le schéma habituel client-serveur mais d'être directement intégré aux programmes. L'intégralité de la base de données (déclarations, tables, index et données) est stockée dans un fichier indépendant de la plateforme. De par son extrême légèreté (moins de 300 Ko), elle est également très populaire sur les systèmes embarqués, notamment sur la plupart des smartphones modernes. Afin d'intégrer les aspects géographiques, nous utilisons SpatiaLite, qui est une extension de SQLite⁵ avec des fonctions géographiques. Ce moteur de gestion de données nous paraît une excellente solution pour une utilisation portable du

5. <http://www.sqlite.org/>

TABLE 3.13 – Dictionnaire de données de la table TypeLargeur

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDTypeLargeur	Entier	-	Identifiant unique système
szCodeTypeLargeur	Chaîne de caractères	3 caractères	Codification unique alphanumérique du type de revêtement
nLargeurMin_m	Entier	-	Largeur minimum en m incluse de la catégorie
nLargeurMax_m	Entier	-	Largeur maximum en m exclue de la catégorie
fTypeLargeurPondCout	Réel	Entre 1 et 2	Facteur de pondération affecté au type de largeur lors d'un calcul d'itinéraire

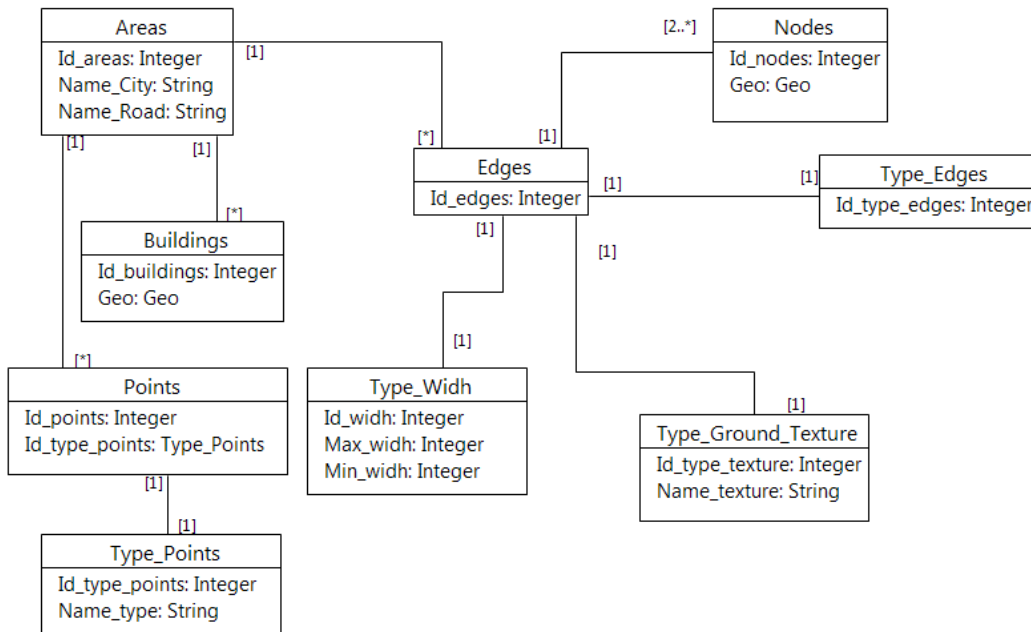


FIGURE 3.19 – Extrait du modèle conceptuel de données représentant la base de données.

système. L'aspect portabilité a donc été privilégié sans néanmoins sacrifier la performance et la rapidité du temps de réponse.

3.5.1.3 Collecte des données

Une fois la classification définie et le squelette de la base de données mis en place, il s'agit de peupler la base en insérant les données appropriées. Plusieurs sources de données géographiques libres (Open Street Map, Open Toulouse) ou payantes (Navteq, TéléAtlas) existent. Cependant toutes manquent de précision et sont limitées par l'objectif pour lequel elles ont été conçues (navigation voitures, gestion urbaine, etc.). Comme présenté dans l'état de l'art, actuellement et à notre connaissance, aucune base de données géographiques n'intègre l'ensemble des informations géographiques nécessaires pour un système

TABLE 3.14 – Le dictionnaire de données de la table Arc

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDArc	Entier	-	Identifiant unique système
nIDNoeud1	Entier	-	Identifiant unique système du premier noeud
nIDNoeud2	Entier	-	Identifiant unique système du second noeud
fLongueur_m	Réel	-	Longueur de l'arc en m (-1 si inconnu)
fLargeur_m	Réel	-	Largeur de l'arc en m (-1 si inconnu) > Il s'agit de la largeur totale de l'arc.
GeoArc	Chaîne de caractères	Max 8000	Données géométrique du point au format (WKT : Well-Known Text)
nIDLieu	Entier	-	Identifiant unique système du lieu
nIDTypeArc	Entier	-	Identifiant unique système du type d'arc
nIDTypeRevetement	Entier	-	Identifiant unique système du type de revêtement
nIDTypeLargeur	Entier	-	Identifiant unique système du type de largeur (champ calculé)
fCoutArc	Réel	-	Cout global de l'arc pour le calcul de l'itinéraire (champs calculé)
nNumeroRueMin	Entier	-	Numéro de rue minimum (-1 si inconnu)
nNumeroRueMax	Entier	-	Numéro de rue maximum (-1 si inconnu)
bSensUnique	Entier	-	0 : double sens 1 : sens unique

TABLE 3.15 – Dictionnaire de données de la table TbPoint

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDPoint	Entier	-	Identifiant unique système
szDescriptionPoint	-	-	Nom du point
szNomPoint	Chaîne de caractère	50 car. Max	
szDescriptionPoint	Chaîne de caractère	100 car. car.max	Description du point
fLongitude_Deg	Réel		-
fLatitude_Deg	Réel		-
fAltitude_m	Réel		-
GeoPoint	Chaîne de caractère	50 max	Données géométrique du point au format (WKT : Well-Known Text)
fPortee_m	Réel	-	Portée du point (-1 si non utilisé)
szSNV_Modelename	Chaîne de caractère	255 car. Max	Chemin du fichier modèle pour le module SNV (' ' si non utilisé)
szCodesTypePoint	Chaîne de caractère	255 car. Max	Les codes sont les suivants : « POI » : point d'intérêts « PR » : Point de repère « PF » : point préféré enregistré par l'utilisateur « PV » : point pour le module SNV

TABLE 3.16 – Dictionnaire de données de la table TbPolygone

Champs	Type	Taille	Commentaires
nIDPolygone	Entier	-	Identifiant unique système
nIDTypePolygone	Entier	-	Identifiant unique système du type de polygone
GeoPolygone	Chaîne de caractère	1000 max	Données géométrique du point au format (WKT : Well-Known Text)
szCodeTypePolygone	Chaîne de caractère	255 max	code de type de polygone : « BAT » : Bâtiment « EAU » : fleuve, lac ou rivière

d'assistance à la navigation pour les déficients visuels.

La collecte d'information est une procédure assez lourde qui nécessite un travail conséquent. Pour la collecte de données, nous avons décidé de limiter notre champ d'étude au campus de l'université. Cette zone géographique sera le théâtre de nos tests dans la suite de ce travail. Il faut noter que ce travail sert à mettre en place la structure de la base de données qui peut être utilisable n'importe où à condition de disposer des informations géographiques nécessaires.

Comme première source de données, nous nous sommes basés sur les données déjà existantes dans Open Street Map ainsi que dans la base de données géographique de l'université Paul Sabatier que nous avons pu récupérer grâce au département géographie de l'université. Un premier travail a été réalisé afin de collecter les données géographiques qui nous intéressaient sur le trajet test. La figure 3.20 représente une esquisse papier de ce travail.

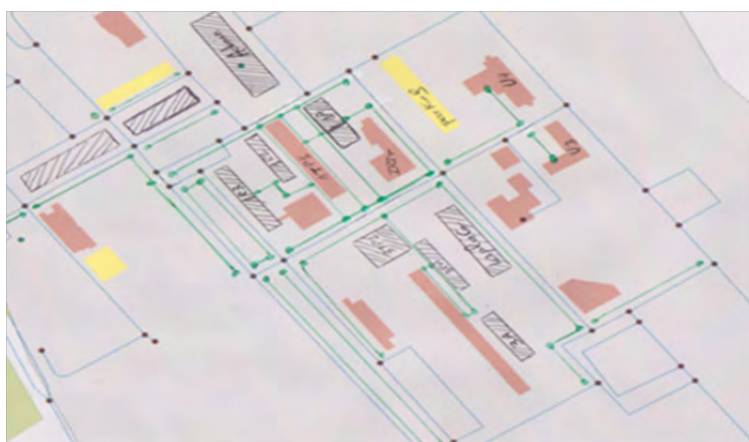


FIGURE 3.20 – Un exemple d'esquisse utilisé lors de la collecte de données sur le campus. Le domaine de l'université étant considéré comme privé, les données géographiques de Google Map, par exemple, ne sont pas utilisables et ne sont pas assez précises.

Les données ont été renseignées dans la base en utilisant l'éditeur Quantum GIS (QGIS). QGIS permet de mettre à jour les données géographiques avec une interface assez conviviale en rajoutant les objets ainsi que leurs caractéristiques respectives ou en saisissant directement les objets avec leurs coordonnées dans les tables de la base. Il est aussi possible d'utiliser les requêtes SQL pour renseigner la base de données.

3.5.2 Le moteur cartographique

Il regroupe un ensemble de fonctions permettant l'extraction d'informations à partir de la base de données. Ces fonctions doivent permettre au système ou à l'utilisateur d'exploiter convenablement les données stockées. En se basant sur l'état de l'art ainsi que sur les demandes et les besoins que nous avons pu recenser tout au long de nos séances de conception participative, nous avons dégagé un ensemble de fonctions que nous détaillons ici et dans le Tableau 3.17 :

- Liste des points dans un disque : Cette fonction permet de retrouver tous les points marqués dans la base de données comme POI, PR ou PV, et ce dans le rayon d'un cercle. Le centre et le rayon sont envoyés comme paramètres. Cette fonction permet de répondre à des requêtes formulées par l'utilisateur ou par un autre module du système.

- Liste des polygones dans un cercle : Identique à la précédente fonction mais retourne l'ensemble des polygones dans un cercle. Le centre et le rayon sont passés en paramètres.
- Liste des points dans un linéaire : Le fonctionnement de cette fonction est similaire à la précédente, mais retourne la liste des points autour d'un linéaire selon une distance définie.
- Liste des bâtiments dans un polygone : Comme la précédente fonction mais spécifique au polygone. Elle cherche et retourne l'ensemble des polygones existants complètement ou en partie dans un polygone donné.
- Liste des lieux dans un disque : Permet de retourner l'ensemble des lieux (nom de rue, place, etc.) dans un cercle. Le centre et le rayon sont passés comme paramètres.
- Où suis-je : Cette fonction assure la conversion d'une position géographique sous la forme d'une adresse (numéro, rue et lieu).
- Le calcul d'itinéraire : C'est l'une des fonctions les plus importantes. En effet trouver un itinéraire adapté au piéton est déjà une tâche compliquée en raison de l'absence des chemins piétons (comme les trottoirs ou les passages piétons) dans la base de données. Le fait de rajouter ces données dans la base ne résout pas totalement le problème si l'on veut calculer le meilleur itinéraire pour un déficient visuel. En effet, le plus court chemin n'est pas forcément le plus simple à réaliser. Nous avons choisi de travailler sur cette fonction afin de prendre en compte les besoins des utilisateurs en proposant de nouvelles méthodes de calcul (cf. section suivante).

En plus de ces fonctions d'extraction, trois fonctions ont été proposées pour ajouter, modifier ou supprimer un point. Ces fonctions permettent, par exemple, d'insérer les points particuliers comme les PV.

Les différentes fonctions présentées ont été implémentées. Un serveur SIG a été mis en place. Il s'agit d'un module qui encapsule l'ensemble des fonctions et qui interroge la base de données par des requêtes SQL prédéfinies. Nous détaillerons en particulier la fonction permettant le calcul d'itinéraire.

3.5.2.1 Le calculateur d'itinéraire adapté

Lors de la sélection d'un itinéraire adapté aux non-voyants, les contraintes sont nombreuses et dépendent fortement de l'utilisateur. En général, les non-voyants peuvent préférer une route plus longue si elle leur permet d'éviter certaines difficultés ou certains obstacles, mais il arrive qu'ils préfèrent prendre le chemin le plus rapide même s'il les entraîne dans des situations moins confortables. Le choix de l'optimisation du trajet varie donc en fonction de l'utilisateur (suivant son expérience en mobilité) mais aussi en fonction du type de déplacement (milieu connu ou inconnu, balade ou rendez-vous, etc.).

Nous proposons une méthodologie qui ne tient pas compte uniquement de la distance, mais intègre d'autres critères relatifs aux points de repère, points d'intérêt ou points d'ancrage visuels présents sur chaque section. Ce calcul est fortement dépendant de la classification que nous avons proposée. Néanmoins, il peut être adapté à d'autres situations et selon les besoins des utilisateurs. L'idée que nous proposons consiste à attribuer à chaque arc du graphe une nouvelle valeur « coût » qui dépend de la longueur de l'arc et de la présence de points particuliers (PR, POI et PV).

Le choix des coefficients de pondération doit être personnalisable selon les utilisateurs ou bien l'environnement dans lequel la tâche de navigation se déroulera. Par exemple, dans un centre-ville dense où le GPS n'est pas assez fiable, mais les cibles visuelles fréquentes, il est souhaitable de donner un poids plus important aux cibles visuelles qu'aux

TABLE 3.17 – L'ensemble des primitives implémentées dans le moteur cartographique.

Nom de la primitive	Code Message de l'appel client	Code Message de la réponse du serveur
Spatialite	SPATIALITE	SPATIALITE_R
Point_ListeDansDisque	PT_LD	PT_LD_R
Point_ListeDansLineaire	PT_LL	PT_LL_R
Point_Ajouter	PT_A	PT_A_R
Point_Modifier	PT_M	PT_M_R
Point_Supprimer	PT_S	PT_S_R
Polygone_ListeDansDisque	PO_LD	PO_LD_R
Polygone_ListeDansPolygone	PO_LPO	PO_LPO_R
Lieu_ListeDansDisque	L_LD	L_LD_R
Pos_Adresse	POS_ADD	POS_ADD_R
TypeArc_ListePreference	ARC_PREF_L	ARC_PREF_L_R
TypeArc_ModifierPreference	ARC_PREF_M	ARC_PREF_M_R
TypeRevetement_ListePreference	REV_PREF_L	REV_PREF_L_R
TypeRevetement_ModifierPreference	REV_PREF_M	REV_PREF_M_R
TypeLargeur_ListePreference	LARG_PREF_L	LARG_PREF_L_R
TypeLargeur_ModifierPreference	LARG_PREF_M	LARG_PREF_M_R
Itin_DePosAPos	ITI	ITI_R
ListeInfoNoeud	ND_L	ND_L_R
OuSuisJe	OU	OU_R
Erreur	(non envoyé par le client)	ERR

signaux satellites. A l’opposé, si l’utilisateur est en mode découverte par exemple, et aimerait avoir plus d’informations sur les POI, un poids plus élevé sera accordé à ce type de points particuliers. Dans une première version nous allons nous inspirer des travaux de [Swobodzinski & Raubal 2009] pour attribuer les différentes pondérations. Lors du calcul d’un itinéraire, les 3 types de points définis précédemment interviennent (POI, PR et PV). La question qui se pose maintenant est : quelle est la distance à partir de laquelle le point n’est plus considéré comme étant sur l’arc ? Pour y répondre, nous avancerons point par point en s’appuyant sur les travaux suivants [Golledge *et al.* 1991][Völkel & Weber 2008] et sur les définitions que nous avons proposées pour chaque type de point.

- Pour les POI : L’idée est de les utiliser pour offrir à l’utilisateur la représentation la plus fidèle possible de l’environnement. Il est donc intéressant d’avoir un nombre important de POI pour offrir une bonne représentation spatiale. La difficulté est de trouver la distance optimale qui permet au système de charger un nombre suffisant de POI autour de l’utilisateur. Une distance de 30 mètres a été proposée par [Loomis *et al.* 1998] dans un contexte qui peut être assimilable au nôtre. Nous optons pour cette distance mais nous laissons le choix à l’utilisateur lors de la configuration des options de calcul.
- Pour les PR : Selon la définition, il s’agit de points de repères non visuels (olfactifs, sonores ou tactiles). Cela signifie qu’ils sont détectables et reconnaissables par l’utilisateur, à condition qu’ils figurent dans son espace proche. Bien qu’ils puissent varier en fonction de la modalité sensorielle (son vs. Repère tactile) nous avons adopté une valeur moyenne de 10 m pour commencer les tests du système (voir [Völkel & Kühn 2008]). Comme pour les POIs, cette distance peut être modifiée par l’expérimentateur ou l’utilisateur du système.
- Pour les PV : Ces points ne concernent pas directement l’utilisateur, mais sont utilisés par le système afin d’améliorer le positionnement. La distance des points dépend fortement des capacités du système de vision artificielle embarqué, de la taille des objets à reconnaître, de la robustesse des modèles et du moteur de reconnaissance. Cette distance dépend donc de plusieurs facteurs. Nous avons fixé une distance d’activation moyenne de 20 mètres.

La longueur d’un arc, son type (trottoirs, passages piétons, etc.), son revêtement et sa largeur sont aussi des facteurs importants à prendre en considération dans le choix d’un itinéraire en fonction de différentes valeurs de pondération.. La fonction commence par rechercher l’arc sur lequel se trouve la position de départ, ainsi que l’arc sur lequel se trouve la position d’arrivée ; les points aux deux extrémités sont donc maintenant définis. Ensuite, le système va rechercher un itinéraire possible parmi l’ensemble des arcs intermédiaires afin de minimiser le coût total de l’itinéraire. Le coût d’un itinéraire entre les points i et j est donc calculé par cette fonction :

$$C(i, j) = \text{LongueurNormalisée} + Nb(\text{POI}) + Nb(\text{PR}) + Nb(\text{PSNV})$$

La normalisation de la distance d’une section est réalisée par une fonction linéaire nous utilisons la méthode proposée par [Völkel & Weber 2008] et présenté dans la figure 3.21. Cette technique permet de respecter les proportions initiales entre les différentes valeurs.

Cette méthode permet de sélectionner un itinéraire en prenant en considération à valeur égale la présence de POI, PR ou PV. Nous pouvons rajouter des pondérations pour favoriser un type de points plutôt qu’un autre.

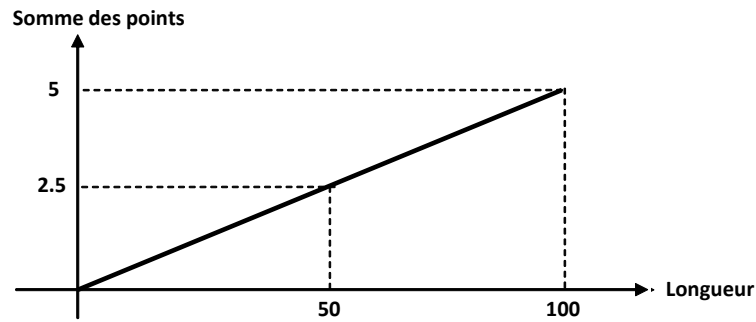


FIGURE 3.21 – La fonction de normalisation de la distance

3.5.3 Le serveur SIG

Le serveur SIG intègre la base de données et l'ensemble des primitives décrites précédemment. Il a été décidé de connecter le serveur SIG à l'ensemble des modules au moyen d'une connexion par sockets. Cette architecture permet des accès concurrents aux données. Tout module peut donc envoyer une requête au moteur cartographique en respectant une syntaxe bien spécifique et recevoir la réponse à sa requête. Le serveur SIG est en attente de connexion des clients sur un port. Les modules de NAVIG sont toujours à l'initiative d'un échange. Pour chaque échange, 2 messages sont envoyés : un premier message pour la demande, un deuxième contenant la réponse. Si le serveur n'interprète pas bien le message, ou bien s'il ne peut pas répondre, un message de type ERREUR est envoyé avec des informations complémentaires éventuelles.

Les requêtes et les réponses sont formulées en XML via une syntaxe appropriée. Pour avoir la liste des points dans un disque par exemple, les messages échangés sont les suivants :

Message envoyé l'agent demandeur

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1" ?>
<SIG>
<msg> PT_LD </msg>
<data>
< fCentreDisqueLong_Deg>1.3465< / fCentreDisqueLong_Deg >
< fCentreDisqueLat_Deg>43.2345< / fCentreDisqueLat_Deg >
<fRayon_m>450</fRayon_m>
<bPorteeActive>20</bPorteeActive>
</data>
</SIG>
```

La balise « msg » contient le code du message alors que la balise « data » contient les données structurées liées au message. « PT_LD » par exemple est le code de la primitive qui recherche les points dans un disque. 1.3465 et 43.2345 sont respectivement la longitude et la latitude du centre du disque alors que 50 est le rayon du disque, 20 est la portée des points SNV s'ils existent. La réponse du serveur SIG à cette requête est la suivante :

Message envoyé par le serveur

```

<data>
<Row
nIDPoint="1"
szNom="'Carrefour'"
szDescription="'Centre commercial'"
fLongitude_Deg="1.234"
fLatitude_Deg="43.2345"
fAltitude_m="123.6"
szCodeTypePoint="'POI,PR,PF'"
f_Portee_m="50.0"
szSNV_Modelename"BOiteaulette"
/>
<Row
nIDPoint="1"
szNom="'Carrefour'"
szDescription="'Centre commercial2'"
fLongitude_Deg="1.2345"
fLatitude_Deg="43.2346"
fAltitude_m="120.0"
szCodeTypePoint="POI"
f_Portee_m="50.0" szSNV_Modelename"façadeMC"
/>
</data>

```

La réponse du serveur est traitée par les différents modules selon les besoins de la tâche. Ainsi les différents modules de NAVIG ayant besoin d'informations géographiques peuvent ouvrir des sockets pour envoyer des requêtes au serveur SIG.

3.5.4 Discussion

Suite à plusieurs séances de brainstorming et en se basant sur une étude bibliographique, nous avons conçu un Système d'Information Géographique (SIG) adapté aux piétons déficients visuels. En premier lieu nous avons proposé une nouvelle classification des données. Cette classification se base sur 4 types d'objets particuliers (les chemins piétons, les points d'intérêts, les points de repères et les cibles visuelles).

Un modèle conceptuel de données permettant de gérer cette classification a été proposée. Ce modèle est spécifique à NAVIG car il permet de gérer les cibles visuelles (PV). Cependant, il peut être généralisé à n'importe quel système d'aide à la navigation avec un minimum d'adaptations. Nous avons illustré cette approche sur une zone géographique réduite dans le campus de l'université. Afin de reproduire cette approche, un relevé test sur deux itinéraires dans la ville de Toulouse a été réalisé par une société spécialisée (véhicule équipé de caméras, GPS et faisceaux lasers) pour constituer une base de données complète et précise. Ces collectes ont été commanditées par Toulouse Métropole mais n'ont pas été utilisées pour l'instant. Comme nous le voyons, la collecte et la mise à jour des données restent les processus les plus fastidieux. Nous pensons que l'utilisabilité d'un système d'assistance à la navigation est fortement corrélée à la complétude et à l'exactitude des données géographiques.

Une deuxième contribution a consisté à créer un moteur cartographique capable d'interroger la base précédemment définie avec un ensemble de primitives permettant d'extraire les données géographiques selon les besoins et la tâche de l'utilisateur. Plusieurs primitives ont été définies et implémentées. Une syntaxe XML a été mise en place afin de faciliter la communication entre le serveur SIG et l'ensemble des modules de NAVIG. La primitive permettant le calcul l'itinéraire a été définie afin de proposer un itinéraire respectant les besoins des utilisateurs (points de repères et points d'intérêts) et du système (cibles visuelles). En effet le plus court chemin n'est pas toujours la meilleure solution. Une première évaluation ad-hoc a montré les différentes possibilités et la souplesse de cet algorithme afin d'intégrer d'autres critères de sélection d'itinéraire en plus de la distance. Cependant, nous pensons que d'autres critères peuvent aussi être pris en compte lors du calcul du coût d'une section comme la sécurité. Un compromis doit néanmoins exister entre les différents critères pour pouvoir proposer des itinéraires optimaux pour les utilisateurs. Les différents coefficients de pondération ont été définis suite aux discussions avec les formateurs en locomotion, mais la validation expérimentale de ces coefficients reste un travail indispensable.

L'approche proposée ici permet le calcul d'itinéraires adaptés mais elle permet aussi d'offrir une description de l'environnement à l'utilisateur. D'autre part, cette approche permet d'adapter le processus de guidage selon les recommandations présentées dans la section « études des besoins » (voir section 3.2.2). En effet il est possible d'extraire et d'utiliser tous les types de points si l'utilisateur souhaite être guidé et découvrir un quartier. A l'inverse, il est possible de n'extraire que les points de repères dans le cas où l'utilisateur connaît déjà le quartier et ne souhaite pas être informé de la disposition des points d'intérêts par exemple. Il est aussi possible d'extraire uniquement les points SNV si aucune information n'est souhaitée.

3.6 Suivi d'itinéraire et guidage pour les piétons déficients visuels

Une fois l'itinéraire calculé, le guidage peut être lancé. Le guidage consiste à donner, à l'utilisateur descriptions de l'environnement et/ou des instructions pour atteindre la destination voulue. Ce processus se base principalement sur la position actuelle de l'utilisateur par rapport à l'itinéraire, ainsi que sur des modèles de guidage prédéfinis dans le module de sonification. Le suivi d'itinéraire est une fonction interne au système qui permet de savoir sur quelle section ou au plus proche de quelle section de l'itinéraire calculé l'utilisateur se situe. Le suivi d'itinéraire est donc l'étape qui précède le guidage.

3.6.1 Le guidage dans NAVIG

Dans le système NAVIG, le guidage se fait exclusivement par la modalité sonore. Pour cela, nous avons conçu, en collaboration avec le LIMSI (équipe PERSI, cf. le travail de doctorat de G. Parseihan (Parseihian, 2012)), un dispositif de guidage auditif basé sur la synthèse binaurale. Il permet de générer des sons virtuels 3D (localisés par rapport à l'utilisateur) vocaux ou non-vocaux. L'objectif était ici de permettre :

- De générer des trajectoires sonores virtuelles permettant de décrire un lieu (par exemple un carrefour) ou un trajet plutôt qu'en le décrivant verbalement,
- D'indiquer à l'utilisateur la position d'un point, d'un objet ou d'un lieu en l'augmentant avec une source sonore virtuelle.

L'objectif final vise à transmettre des informations visuelles (extraites de la scène) ou cartographiques (extraites de la base de données) en superposant sur l'environnement réel des éléments sonores virtuels. Le rendu final est très dépendant de la précision des modules de positionnement et d'orientation de la tête, du moteur de reconnaissance de formes, ainsi que de la qualité et la quantité des informations présentes dans la base de données géographiques.

L'une des solutions qui permettra d'offrir plus de flexibilité à l'utilisateur et plus de robustesse au module de guidage consiste à adapter les stratégies de suivi afin qu'elles soient moins contraignantes et plus précises.

Dans cette section, nous nous intéressons aux stratégies de suivi. L'adaptation de ces dernières aux spécificités d'un déplacement piéton peut avoir un impact positif sur la précision du guidage et donc sur l'utilisabilité du système.

3.6.2 Vers un suivi d'itinéraire adapté à un déplacement piéton

Le suivi est un processus permettant au système d'assurer un guidage de qualité. En effet c'est cette fonction qui permettra au système de savoir sur quelle section de l'itinéraire se trouve l'utilisateur à tout instant. Un itinéraire étant défini par le système comme une succession de points et de sections, deux approches existent :

- Le suivi par sections
- Le suivi par points d'itinéraire

3.6.2.1 Suivi par section

Ce type de suivi a été utilisé dans plusieurs dispositifs d'aide à la navigation pour DV, [Golledge *et al.* 1998], [Wieser *et al.* 2007]. Un couloir virtuel de largeur fixe contenant les différentes sections d'itinéraire est tracé. Tout au long de son déplacement, l'utilisateur doit rester dans ce couloir virtuel. Autrement dit, l'utilisateur se trouve « prisonnier » de ce couloir. Le fait de sortir de cet espace virtuel génère un message demandant au piéton de retourner dans le couloir. Ce type de suivi ne donne aucune souplesse à l'utilisateur qui se trouve obligé de suivre pas à pas l'itinéraire prévu au risque d'être signalé hors trajet. Le suivi par section est un suivi intéressant car il permet de s'assurer que l'utilisateur est bien sur l'itinéraire. Cependant, il est assez rigide car l'utilisateur doit impérativement rester très proche de l'itinéraire au risque de recevoir des messages d'erreurs. Avec la précision de positionnement actuelle constatée dans les systèmes d'aide à la navigation existants, il est cependant difficile de maintenir l'utilisateur à l'intérieur de ce couloir sauf si celui-ci est élargi, ce qui diminue considérablement la précision lors du guidage. La figure 3.22 présente le concept du couloir virtuel.

3.6.2.2 Le suivi par validation successive des points d'itinéraire

Le suivi par validation des points d'itinéraire repose sur la validation successive (en général lorsque l'utilisateur rentre dans un rayon déterminé) des différents points intermédiaires jusqu'à atteindre le dernier point. Cette stratégie est plus souple que la stratégie du couloir car l'utilisateur a beaucoup plus de latitude lors du parcours de la section en cours. La stratégie du « cercle virtuel » repose sur la validation d'un point d'itinéraire quand l'utilisateur atteint un cercle virtuel placé autour du point en question (voir figure 3.23). La taille du cercle a une influence sur le temps et sur la distance parcourue [Walker & Lindsay 2006]. En effet, un cercle de taille moyenne (environ la taille de deux

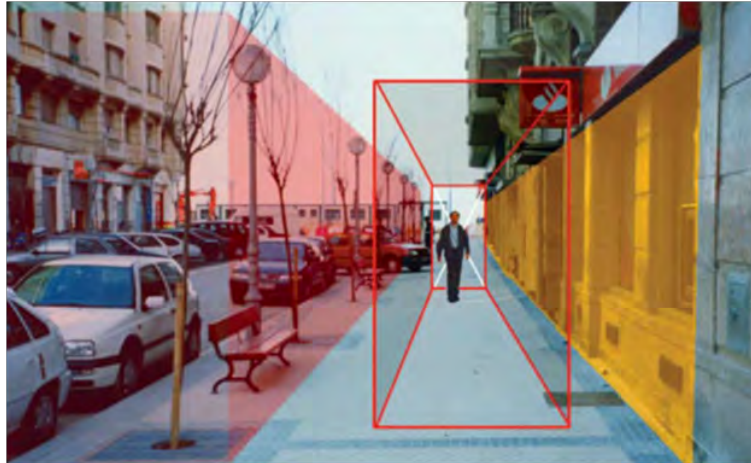


FIGURE 3.22 – Un couloir virtuel est créé. Une erreur est détectée dès que l'utilisateur sort des limites fixées par le couloir virtuel. Adapté de [Centre d'études sur les réseaux 2012]

foulées humaines) est la solution la plus sûre. Un rayon idéal de 1,5 mètre a été proposé dans la littérature.

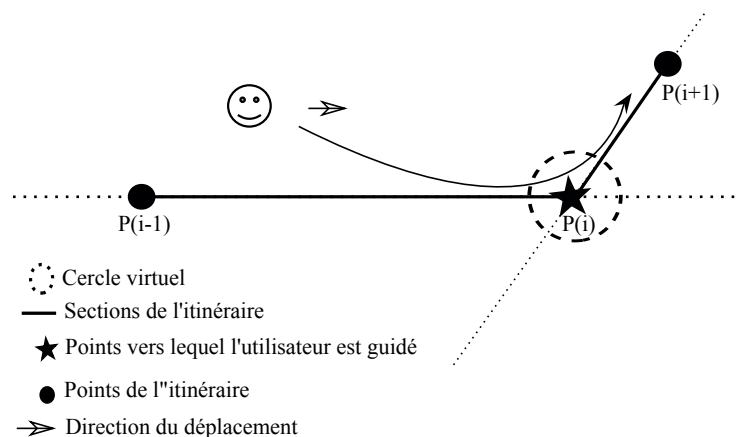


FIGURE 3.23 – Représentation d'un cercle virtuel autour d'un point d'itinéraire. Quand l'utilisateur atteint le cercle le point suivant est signalé.

L'inconvénient majeur de cette stratégie de validation réside dans le fait qu'il faut absolument traverser le cercle virtuel de rayon r pour pouvoir valider un point d'itinéraire. Pour ce faire, la précision du module de positionnement doit être inférieure au rayon de ce cercle virtuel. Or, cette précision est difficile à atteindre dans un contexte de navigation pédestre dans un milieu urbain. Si le positionnement est imprécis, l'utilisateur risque de tourner en rond autour du point sans pouvoir le valider. La solution qui consisterait à agrandir le rayon du cercle virtuel pose aussi un problème. En effet on risque de valider un point assez rapidement sans l'avoir approché réellement.

À notre connaissance, tous les systèmes d'assistance à la navigation commercialisés utilisent la stratégie du cercle virtuel pour suivre l'utilisateur. Nous pensons qu'améliorer le guidage proposé par ces systèmes passe en premier par une amélioration des stratégies de suivi. Par conséquent, nous avons réalisé des séances de brainstorming qui ont permis de proposer 4 nouvelles stratégies qui ont été évaluées dans un second temps.

Distance aux droites La première stratégie proposée consiste à valider le point d'itinéraire (PI) lorsque l'utilisateur est plus près de la section d'itinéraire suivante que de l'actuelle. Pour cela nous calculons les distances entre l'utilisateur et la droite décrite par la section actuelle ($d1$), ainsi qu'avec la droite décrite par la section suivante ($d2$). Le PI est donc validé lorsque $d2$ devient plus petite que $d1$, ce qui définit les frontières de validation comme les bissectrices des 2 angles formés par les deux droites. La figure 3.24 illustre un cas de validation d'un PI. Dès les pré-tests nous nous sommes aperçus que cette stratégie rendait plus souple la validation, et autorisait l'utilisateur à couper les virages. Mais un problème survient quand deux sections sont alignées. Les droites se chevauchant, le PI est validé juste après son apparition.

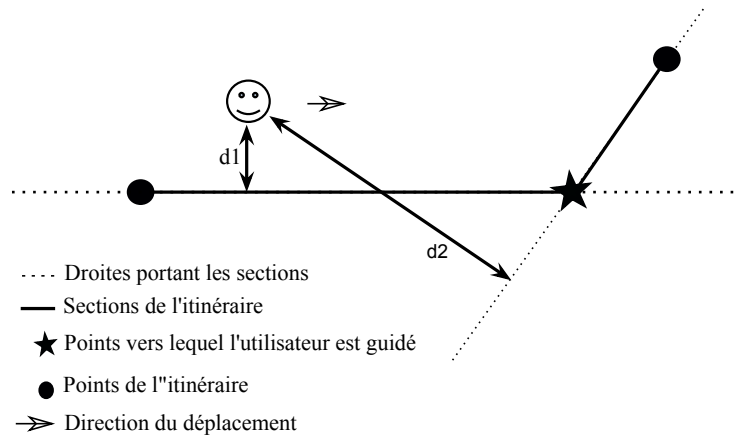


FIGURE 3.24 – Illustration de la stratégie des distances par rapport aux droites

La validation du dernier point de l'itinéraire (point d'arrivée) est toujours assurée par la stratégie du cercle virtuel.

Distance aux sections Afin d'éviter la validation rapide de deux points sur la même droite, nous avons proposé une nouvelle stratégie qui est une variante de la première. La différence est que le calcul des distances se fait cette fois entre l'utilisateur et le point le plus proche appartenant aux segments (à la place des droites) décrits par les sections d'itinéraire. Le principe reste donc le même, le point est validé lorsque la distance $d2$ devient inférieure ou égale à la distance $d1$. Cette légère différence modifie les frontières de validation de manière à annuler l'inconvénient de la stratégie précédente lorsque les deux segments sont alignés. La figure 3.25 illustre un cas de validation d'un PI par cette stratégie.

La validation du dernier point de l'itinéraire (point d'arrivée) est toujours assurée par la stratégie du cercle virtuel.

Distance à la bissectrice Dans cette troisième stratégie l'idée consiste à placer deux points sur l'itinéraire, un juste avant, et l'autre juste après le PI. De cette manière nous pouvons calculer deux distances $d1$ et $d2$ comme le montre la figure 3.26. Comme précédemment le PI sera validé lorsque la distance $d2$ sera inférieure à $d1$. En plaçant ces deux points à la même distance du PI, cette stratégie décrit une frontière de validation qui est la bissectrice de l'angle formé par les deux sections.

La validation du dernier point de l'itinéraire (point d'arrivée) est toujours assurée par la stratégie du cercle virtuel.

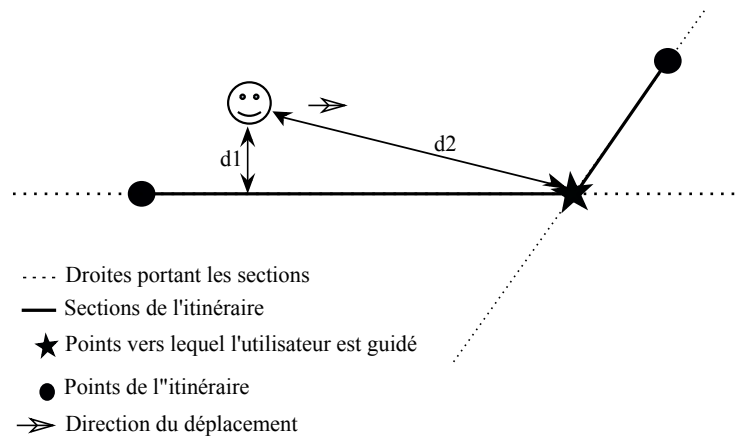


FIGURE 3.25 – Illustration de la validation d'un PI par distance aux segments

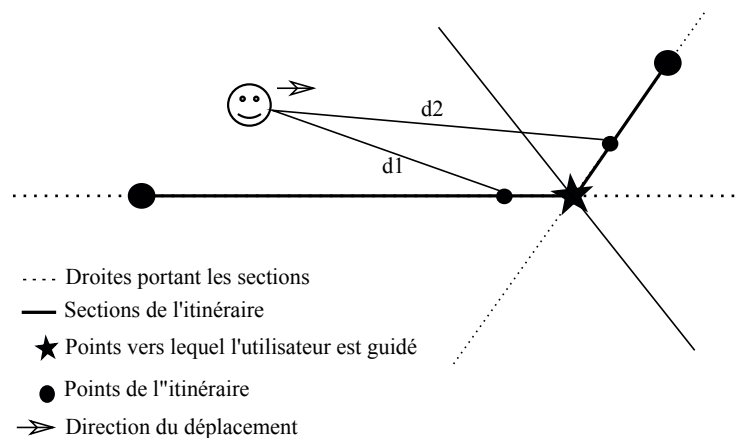


FIGURE 3.26 – Illustration de la validation d'un PI par distance aux segments

Distance projetée Cette quatrième et dernière stratégie repose sur deux hypothèses :

- L'utilisateur conserve relativement bien sa direction le long d'une section (la formation en mobilité permet d'acquérir cette compétence).
- L'erreur de localisation est en grande partie répartie sur les côtés.

Nous calculons la projetée orthogonale de la position estimée de l'utilisateur sur la section actuelle. Nous reprenons ensuite le principe de la stratégie « capture radius » avec cette nouvelle position projetée, en mesurant la distance au point d'itinéraire (d_{pi}). Lorsque cette distance est inférieure à un seuil (d_{min}), le PI est validé.

Nous nous inspirons des résultats proposées par [Walker & Lindsay 2006] pour fixer d_{min} à 1,5 mètres. Cette stratégie définit donc une frontière de validation perpendiculaire à la section actuelle, et placée 1,5m avant le point d'itinéraire.

La particularité de cette stratégie est qu'elle ne dépend pas de la section suivante, elle est donc insensible à la valeur de l'angle du virage, et peut être utilisée pour valider le dernier PI (point d'arrivée). Par rapport à la stratégie du cercle virtuel, cette stratégie de validation présente l'avantage de ne pas restreindre la zone de validation à un cercle puisqu'elle offre une zone de validation plus large (demi-plan).

La figure 3.28 représente les différentes sections du plan à partir desquelles le point d'itinéraire est validé pour les 4 stratégies proposées. Nous choisissons d'illustrer avec deux cas opposés correspondant à un angle grave et à un angle aigu.

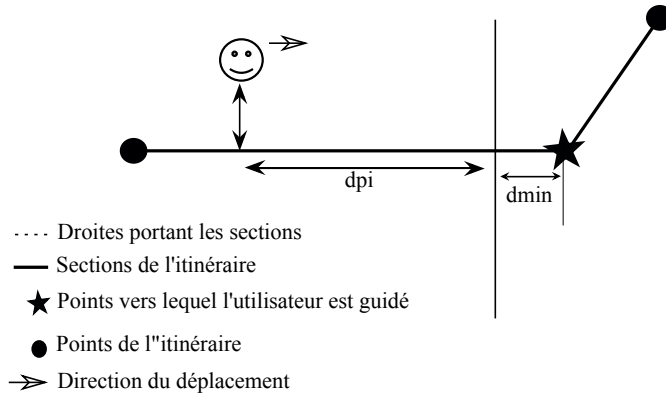


FIGURE 3.27 – Illustration de la stratégie de validation par la distance projetée

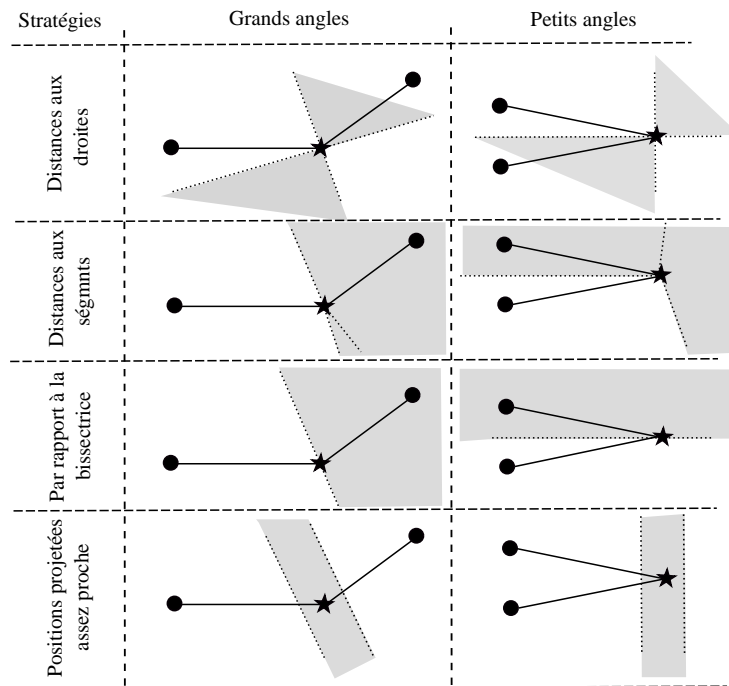


FIGURE 3.28 – Les différentes stratégies de suivi ainsi que les parties du plan à partir desquelles le point d'itinéraire en cours (étoile) est validé.

Ces différentes stratégies de validations de points d'itinéraires ont été implémentées dans le système NAVIG et plus particulièrement dans l'agent contrôleur de dialogue. L'évaluation de leurs performances et de leur impact sur le processus de navigation en utilisant un système d'aide à la navigation est nécessaire. Dans ce qui suit nous présentons le contrôleur de dialogue de NAVIG.

Ces différentes stratégies de suivi seront implémentées et évaluées dans un simulateur développé dans le cadre de ce travail (voir chapitre 4). Une évaluation des différentes stratégies de suivi sera réalisée avec des sujets privés de vision afin de déterminer les performances de ces stratégies. Nous présentons aussi une comparaison entre un suivi par points et un suivi par points et par section.

3.6.3 Le contrôleur de dialogue

Placé au cœur du système, le contrôleur de dialogue (CD) est en quelque sorte la partie "intelligente" du système. Ce module, développé en C++, communique avec la quasi-totalité des modules. Il présente un tableau de bord permettant la gestion du système NAVIG. Le CD est l'agent qui contient les méthodes utilisées pour le suivi et le guidage. La figure 3.29 présente le tableau de bord du CD. Nous présentons par la suite les fonctions importantes dans le cadre de ce travail.

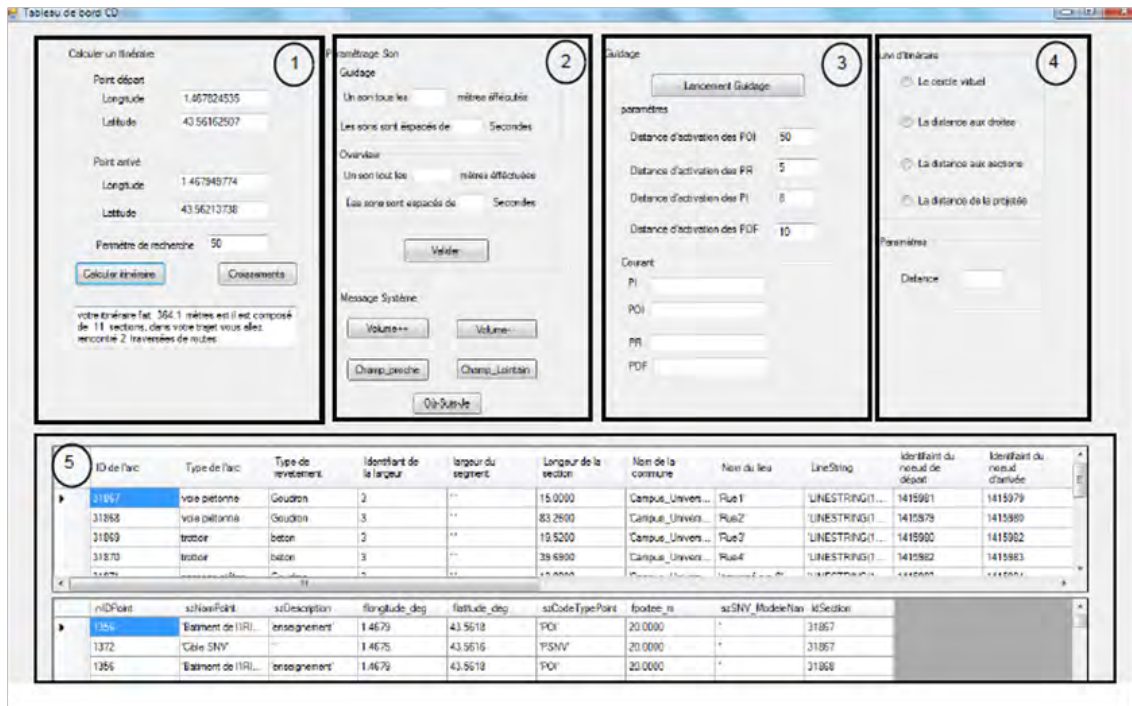


FIGURE 3.29 – Tableau de bord du contrôleur de dialogue. Les différentes parties distinctes sont encadrées. Elles seront détaillées dans la suite.

Le contrôleur de dialogue est l'agent central dans le système NAVIG, il communique avec les autres agents au moyen du bus logiciel Ivy et de sockets pour le SIG. Les différentes tâches dévolues au CD :

- Gestion de l'interaction : le CD gère le module d'interaction en entrée à travers l'interprétation des instructions utilisateurs ainsi que la configuration de l'interface de restitution (volume, fréquence, etc.). Le CD assure aussi la gestion des messages émis vers l'utilisateur en répondant aux différentes requêtes de l'utilisateur (quoi envoyer et quand l'envoyer).
- Gestion de l'itinéraire, présentée dans la section 3.6.3.1
- Gestion du suivi, présentée dans la section 3.6.3.2
- Gestion du guidage, détaillée dans la section 3.6.3.3

Dans la suite, nous présentons en détails les trois principales fonctions du contrôleur de dialogue.

3.6.3.1 La gestion de l'itinéraire

Le calcul d'itinéraire est une primitive implémentée dans le moteur cartographique du SIG. Le CD doit interroger le moteur cartographique afin d'obtenir une réponse contenant

cet itinéraire. Un premier message est envoyé sur la connexion par depuis le CD vers le SIG incluant les informations nécessaires pour calculer un itinéraire (adresse de départ, adresse de destination, paramètres supplémentaires, etc.). Le moteur cartographique interprète le message reçu et interroge la base de données. Il renvoie la réponse sous forme d'un ensemble de section qui forme l'itinéraire. Pour chaque section, il suffit d'extraire les sommets pour avoir une liste de points qui décrivent l'itinéraire. Dans un deuxième temps, et afin d'extraire la liste des POI, PR et PV et PDF, une deuxième vague de requêtes est envoyée au moteur cartographique avec cette fois-ci la primitive qui permet d'extraire les points autour d'un linéaire. Un message par section sera envoyé. A la fin de cette procédure le CD dispose de la totalité de l'itinéraire comme présenté par la figure 3.30.

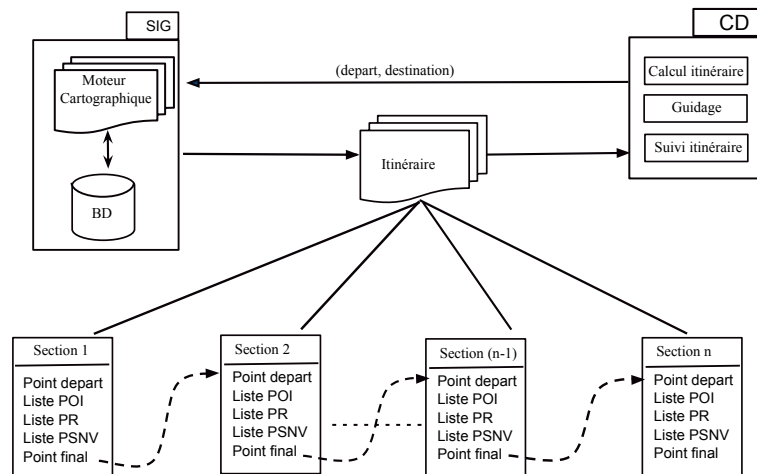


FIGURE 3.30 – Processus de calcul d'un itinéraire. Le CD se charge de transformer les données de l'utilisateur en requêtes compréhensibles par le moteur cartographique

Nous pouvons voir la partie de l'interface dédiée au lancement d'un calcul d'itinéraire dans la figure 3.29 (Encadré 1). L'expérimentateur saisit les coordonnées géographiques (latitude, longitude) des points de départ et de destination ainsi que les valeurs des différentes distances qui seront utilisées par le moteur cartographique (distance aux POI, PR et PV). L'itinéraire sélectionné est renvoyé au CD par le moteur cartographique. Il est représenté dans la figure 3.29, encadré 5. Nous pouvons voir dans le premier tableau les différentes sections et dans le deuxième tableau l'ensemble des points par section ainsi que les propriétés de chaque point (position, type, etc.).

3.6.3.2 Gestion du suivi de l'itinéraire

Dans sa version actuelle, le CD implémente les 4 stratégies de suivi proposées basées sur la validation par point d'itinéraire. Une fois l'itinéraire calculé, l'expérimentateur sélectionne le type de suivi qu'il désire utiliser et définit les paramètres relatifs au type de suivi, le cas échéant (voir la section 4 dans la figure 3.29). Le CD dispose de l'information sur la position de l'utilisateur grâce aux messages Ivy émis par le module FUS (pour le module de fusion) ou POS (si le positionnement est uniquement basé sur le GPS). En se basant sur l'une des stratégies de suivi définies précédemment, le rôle du module de suivi consiste à déterminer la position de l'utilisateur par rapport à l'itinéraire calculé au départ.

3.6.3.3 Gestion du guidage

L'interface de sonification de NAVIG se base exclusivement sur les messages sonores et a fait l'objet d'un travail de thèse mené au sein du laboratoire LIMSI à Paris. L'interface repose sur un moteur de rendu 3D et un système de transcription de texte en message vocal (TTS). Une syntaxe commune a été mise en place pour définir les types de messages à émettre depuis le CD et sur la façon de les sonifier pour l'utilisateur. Le CD se charge uniquement d'envoyer les instructions à présenter (sonifier) mais pas la façon dont la présentation doit être réalisée. Le CD permet la gestion des différents paramètres liés à la sonification (le volume, la fréquence, etc.). Ces différentes possibilités sont représentées dans la figure 3.29 l'encadré 3.

La fonction « gestion de guidage » intègre plusieurs règles ergonomiques inspirées des travaux de Florence Gaunet [Gaunet 2006] permettant la gestion des différents points définis précédemment (voir section 3.5.1.1). Ces règles ont été aussi établies et discutées avec les formateurs en locomotion et en collaboration avec le LIMSI-Ergo partenaire du projet NAVIG [Brunet 2010]. Parallèlement aux points d'itinéraire qui sont sonifiés pour guider les utilisateurs vers la destination finale, les POI, PR, PV et PDF sont aussi traités et gérés par le CD comme suit :

- Pour les POI : Comme nous l'avons indiqué, il s'agit de points d'intérêt existant dans l'environnement dans lequel l'utilisateur évolue (e.g. un bâtiment). Ces points sont indiqués par un moteur de TTS spatialisé. Le nom et l'adresse de chaque POI sont extraits de la base de données et affichés si l'utilisateur s'en approche à une distance donnée. Cette distance est paramétrable dans le CD selon les besoins des expérimentateurs. Elles pourront aussi correspondre à des préférences utilisateurs dans un système commercialisé.
- Pour les PR : Il s'agit de points de repères détectables par un piéton déficient visuel. Le même principe que pour les POI est défini. La distance d'activation d'un PR est aussi paramétrable selon les besoins du concepteur ou les préférences des utilisateurs.
- Pour les PV : Ces Points servent au module de vision pour estimer la position de l'utilisateur. Cette position est ensuite fusionnée avec la position du GPS pour améliorer le positionnement. L'extraction des PV est faite au niveau du CD par les primitives d'extraction de points autour d'un linéaire (section 3.5.3). Le CD, en se basant sur la position de l'utilisateur, la portée de chaque PV, demande l'activation ou la désactivation des modèles qui correspondent au PV en question.
- Les points difficiles (PDF) sont extraits dynamiquement lors d'un calcul d'itinéraire mais sont traités par le module de sonification. Si plusieurs linéaires passent par un nœud, nous considérons qu'il s'agit d'un carrefour. Différents modèles de carrefours peuvent être sonifiés ; deux modèles sont actuellement traités : les carrefours en T et en X qui sont différenciés selon le nombre de sections qu'ils comportent. Les données relatives à ce carrefour (les noms des rues, la présence d'un passage piéton, l'existence ou non de feux de circulations, etc.) sont extraites et envoyées à la sonification. La figure 3.31 présente l'algorithme de guidage implémenté.

Le paramétrage du guidage est réalisé au niveau du CD (encadré 3 dans la figure 3.29). Les distances qui déclenchent l'annonce des différents points sont modifiables directement dans cette interface. La deuxième partie de cet encadré permet le suivi en temps réel des différents points annoncés à l'utilisateur.

Comme nous le verrons dans la section suivante (voir section 3.7), il est difficile d'évaluer en situation réelle les différentes stratégies de suivi proposées. Nous proposons donc de faire ces différentes évaluations dans un environnement virtuel simulant l'utilisation

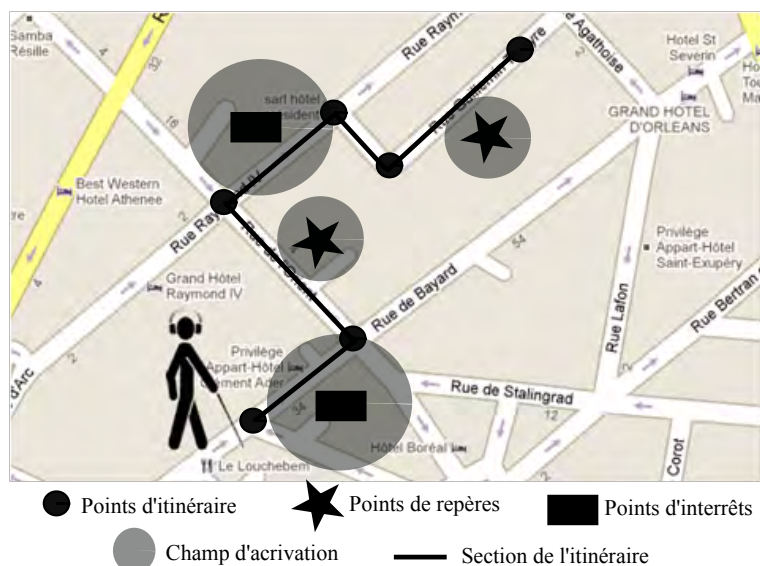


FIGURE 3.31 – Illustration de l'algorithme de guidage proposé en utilisant les différents points annotés.

de NAVIG. Cependant, nous avons réalisé une première preuve de concept du système NAVIG avec deux utilisateurs non voyants. Dans la section suivante nous présentons les premières observations.

3.7 Prototypage et preuve de concept

Dans cette section nous présentons le prototype du système NAVIG au complet. Une première preuve de concept a été réalisée sur le campus de l'université. Un certain nombre de conclusions en ont été tirées. La figure 3.32 présente un utilisateur équipé avec le système NAVIG. La caméra stéréoscopique (Bumblebee) a été placée sur une rotule et fixée sur un casque vélo. Cela nous permet de l'orienter facilement en fonction de la taille de l'utilisateur. Le module de positionnement est placé sur la hanche de l'utilisateur ; l'antenne GPS étant accrochée avec une pince sur la cravate ou l'épaule. Afin de ne pas priver l'utilisateur des sons environnants, nous utilisons un casque stéréophonique à conduction osseuse. Ces casques, qui fonctionnent par transmission osseuse, se placent contre les os de la tête, devant ou derrière les oreilles. Étant donné qu'ils ne couvrent pas les oreilles, leur utilisation permet un masquage minimal des sons naturels.

Un micro est aussi prévu pour recueillir les requêtes utilisateur. Une centrale inertielle est placée sur le casque pour déterminer l'orientation de la tête. Cette information est utilisée par le moteur de sonification pour le rendu 3D. Le SIG et le CD sont embarqués sur un PC placé dans un sac à dos. Le PC utilisé est équipé d'un processeur Intel i7 avec une fréquence de 1.73 GHz avec 4 GB de mémoire. Le PC sert à lancer l'ensemble des modules et à paramétrer les différents modules.

Pour cette preuve de concept, nous avons fait appel à deux utilisateurs faisant partie du panel sélectionné au départ du projet. Les deux sujets étaient motivés et se sont montrés enthousiastes à l'idée de tester le système. La session a duré à peu près 1h pour chacun. Chaque utilisateur a été équipé avec l'ensemble du système. Une phase de familiarisation avec la sonification 3D a tout d'abord été proposée. Le principe était de faire jouer plusieurs sons à des azimuts différents, l'utilisateur devant indiquer la provenance du son (gauche/droite). Une fois l'étape de familiarisation terminée, le sujet a été guidé



FIGURE 3.32 – Un utilisateur équipé avec NAVIG.

par l'expérimentateur vers le point de départ de l'itinéraire. La consigne était de suivre les sons pour atteindre la destination finale. L'utilisation du système complet nous a permis d'acquérir de l'expérience en situation réelle et de faire de nombreuses observations. Dans ce qui suit nous présentons les différents résultats issus de ces tests préliminaires.



FIGURE 3.33 – A gauche, un premier utilisateur utilisant le chien guide au cours de l'utilisation du système NAVIG dans le campus de l'université. A droite, un deuxième utilisateur utilisant la canne en train de réaliser un itinéraire avec le système NAVIG.

Le parcours défini est celui présenté plus haut sur la figure 3.15. Il présente 11 sections avec une distance totale de 380 mètres. Nous avons choisi 10 cibles naturelles sur cet itinéraire. Ces cibles sont enregistrées dans le SIG et les modèles appropriés ont été créés. Après la phase de familiarisation avec les sons 3D, l'utilisateur est placé sur le point de départ et orienté vers le premier point d'itinéraire. L'expérimentateur suit le sujet à quelques mètres de distance pour pouvoir intervenir en cas de difficulté. La fréquence et le volume de sonification ont été réglés à la convenance du sujet. Le suivi a été assuré par la stratégie #4 (Distance projetée). Nous décrivons maintenant le déroulement de ces deux tests.

L'utilisateur #1 avec le chien-guide a eu beaucoup de mal à utiliser le système. En

effet il a fallu intervenir plusieurs fois pour qu'il réussisse à atteindre la destination finale. Tout au long de l'exécution de la tâche, nous avons constaté de nombreuses hésitations aux points de réorientation avec parfois la nécessité d'intervenir pour le remettre sur l'itinéraire. Ces interventions étaient parfois nécessaires car l'itinéraire présente quelques sections à risques (traversée de routes, trottoir élevé sans bordures).

Une discussion post expérimentale a été menée pour recueillir son avis. Nous avons choisi de mener une discussion plutôt que de poser des questions pour cette première preuve de concept. L'utilisateur s'est montré plutôt partagé car habitué à se déplacer avec son chien, il a dit avoir été perturbé entre écouter le système (faire confiance à NAVIG) ou suivre son chien. Un deuxième point important pour les utilisateurs de chien est que si l'environnement est inconnu, le chien a tendance à attendre les directives du maître or là, le maître n'était pas toujours sûr des instructions (problème d'interface sonore) et n'était pas capable de donner des directives claires au chien qui hésitait à son tour. L'interface de restitution a été aussi critiquée. La période de familiarisation a été jugée trop courte et non appropriée à une tâche de navigation dans un environnement réel. L'utilisateur a aussi été gêné par les bruits de l'environnement.

Pour l'utilisateur #2, le résultat final a été plus concluant, ce dernier se déplaçant avec la canne. Il était libre de prendre ses décisions aux points de réorientation contrairement au sujet #1. Cependant nous avons constaté aussi des hésitations et quelques arrêts inattendus sur des sections droites. Dans la discussion post expérimentale, le sujet #2 s'est montré plutôt enthousiaste. Habitué à utiliser la canne, cet utilisateur a souligné qu'un système d'aide à la navigation comme NAVIG pourrait lui permettre d'avoir plus d'informations sur l'environnement dans lequel il évolue et que cela était une idée intéressante.

L'utilisateur #2 a été plutôt à l'aise avec le système NAVIG. Il a utilisé sa canne comme d'habitude en essayant de bien interpréter les messages émis par le système. Nous avons tout de même dû intervenir à deux reprises pour réorienter cet utilisateur. Il s'est montré plutôt satisfait de l'interface sonore mais il n'a pas apprécié le casque à conduction osseuse et préférerait un casque fermé pour améliorer la qualité du son.

Du côté du système lui-même, nous avons eu quelques difficultés de positionnement malgré une fusion des positions en temps réel. L'origine de ces imprécisions a été reliée à des fausses détections de cibles visuelles qui ajoutent potentiellement beaucoup d'erreur. Cependant, nous avons pu noter que lorsque le positionnement était précis, la validation successive des points de l'itinéraire (le suivi d'itinéraire) a fonctionné correctement et permettait un déplacement fluide.

3.7.1 Discussion

La proposition de nouvelles stratégies de suivi adaptées à un déplacement piéton est une tâche nécessaire pour le développement d'aides à la navigation utilisables. La stratégie du cercle virtuel longtemps utilisée dans différents systèmes existants a montré ses limites. Plus le rayon autour d'un point est petit, plus le système est précis, mais plus le point devient difficile à valider. Cela oblige les utilisateurs à tourner autour d'un point pour espérer le valider. Définir des rayons plus grands aurait un impact négatif car le guidage deviendrait alors moins précis, en risquant de valider des points trop tôt. Il faut néanmoins utiliser un dispositif d'interaction auditive adapté pour que le système n'isole pas l'utilisateur de son environnement acoustique, ce qui serait très préjudiciable à la navigation d'un NV.

Cette preuve de concept du prototype NAVIG en situation réelle a permis de confirmer la nécessité de faire des évaluations unitaires des différents modules avant une intégration

complète. Cette constatation vient confirmer l'état de l'art dressé au chapitre 2 et qui fait état de l'absence d'évaluation pour ce type de dispositif. Les premières sorties en situation réelle avec le système NAVIG nous ont permis d'identifier quelques difficultés qu'il va falloir résoudre avant d'envisager des évaluations complètes :

- L'équipement utilisé est assez encombrant, et présente une gêne lors de l'utilisation de la canne ou du chien guide
- La caméra stéréoscopique utilisée (Bumblebee) pèse près de 800 grammes, ce qui rend le port du casque désagréable surtout quand le trajet devient long.
- L'utilisation de cibles naturelles nécessite un effort particulier lors de la création des différents modèles. En effet il a fallu créer les modèles dans les mêmes conditions de luminosité pour optimiser les performances du système de reconnaissance et espérer avoir le meilleur taux de détections en générant le moins de fausses détections possible.
- L'interface sonore basée sur les sons spatialisés nécessite un apprentissage plus poussé pour améliorer l'utilisabilité du système.

L'évaluation et la validation expérimentales des algorithmes de guidage et des différentes stratégies de suivi restent une tâche importante pour s'assurer de leur efficacité dans des situations de navigation réelle. Nous avons commencé par réaliser des évaluations en situation réelle avec le prototype complet du système. Cependant, deux problèmes techniques dépendant de la gestion du projet NAVIG ont perturbé le calendrier des tests :

- La fusion consolidée du positionnement n'était pas encore opérationnelle au début des expériences avec le système complet. En utilisant un GPS commercial à la place du système Angéo-Mobile, nous avons observé des erreurs de positionnement allant jusqu'à 60 m.
- Le moteur de sonification n'était pas non plus finalisé au moment de ces tests, ce qui rendait le guidage de l'utilisateur très délicat.

Ces différents problèmes nous ont poussés à développer d'autres méthodes d'évaluation. L'une des solutions proposée dans la littérature est l'utilisation d'environnements virtuels [Schloerb *et al.* 2010], [Sánchez & Hassler 2006], [Lahav & Mioduser 2008]. Ces plateformes de simulation sont des représentations d'environnements réels dans lesquels sont implémentés différentes modalités d'interaction adaptées aux déficients visuels. Il est ainsi possible de simuler entièrement les fonctions d'un système d'aide à la navigation. Ces plateformes présentent l'avantage d'être des environnements maîtrisés. Elles sont donc idéales pour faire des tests systématiques, en faisant varier les conditions expérimentales, et ceci en toute sécurité (ce qui est un critère très important dans le cas de la navigation de déficients visuels dans des environnements urbains). Dans le chapitre 4, nous décrivons la plateforme expérimentale que nous avons développée. Elle a notamment permis d'évaluer nos différents algorithmes de suivis et de guidage.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes phases de conception et d'implémentation du système NAVIG. NAVIG est un système d'assistance pour déficients visuels. Nous nous sommes focalisés sur la tâche d'aide à la navigation.

En adoptant un processus de conception centré utilisateur, nous avons pu travailler en étroite collaboration avec l'Institut des Jeunes Aveugles de Toulouse. Nous avons organisé plusieurs réunions et diverses séances de conception participative avec des déficients visuels (utilisateurs finaux) ainsi qu'avec des formateurs en locomotion. Ces réunions nous ont permis de mieux comprendre les problèmes existants ainsi que les attentes vis-à-vis d'un

tel système. Afin de rendre ces réunions les plus productives possibles, un travail en amont a consisté à adapter les méthodes de conception participative aux spécificités des non-voyants. Ce travail a permis de mettre en place un ensemble de recommandations que nous avons adoptées tout au long de ce travail. En collaboration avec le LIMSI, nous avons aussi mené une analyse de comportement et une étude des besoins. Les résultats de cette étude nous ont permis de mieux comprendre les spécificités du déplacement d'un déficient visuel avec le chien ou la canne longue. Ces résultats ont orienté nos choix de conception.

La conception et l'implémentation des différents modules ont aussi été décrites dans ce chapitre. Ainsi, nous avons proposé un moteur de fusion capable d'agréger des données issues de plusieurs capteurs (caméras, GPS, centrales inertielles) et de produire un positionnement plus précis. Un système d'informations géographiques intégrant une base de données adapté a été proposé, ainsi qu'un moteur cartographique présentant un ensemble de primitives adaptées pour calculer des itinéraires optimisant le déplacement des piétons non voyants. Nous nous sommes intéressés en particulier à la classification et au stockage de ces données. La collecte de données étant une opération fastidieuse, nous avons proposé quelques solutions envisageables pour parvenir à renseigner ces bases de données. En se basant sur cette classification et les préférences générales des déficients visuels, nous avons montré que les algorithmes traditionnels présentaient des lacunes, et que des solutions plus adaptées lors de la sélection d'itinéraires pour des piétons non voyants sont nécessaires.

Nous nous sommes aussi intéressés au processus de guidage, et plus particulièrement à la fonction assurant le suivi de l'utilisateur lors de la réalisation de son trajet. Quatre nouvelles stratégies ont été proposées. L'évaluation expérimentale des performances de ces stratégies en situation réelle n'était pas compatible avec l'état d'avancement des autres modules, mais aussi pour des raisons de sécurité. L'évaluation expérimentale de ces stratégies de validation des points d'itinéraire dans un environnement virtuel fera l'objet du chapitre 4.

Nous avons aussi présenté une première preuve de concept avec deux utilisateurs non voyants utilisant NAVIG. Ce premier test nous a permis de valider l'approche générale, et aussi d'identifier quelques difficultés techniques à résoudre en prévision des prochaines sessions d'évaluation du système complet.

Un environnement virtuel multimodal pour l'aide à la conception des systèmes d'assistance à la navigation

Sommaire

4.1	La réalité virtuelle	112
4.2	La réalité virtuelle pour les déficients visuels	112
4.3	SIMU4NAV : Un EV pour l'aide à la conception de systèmes d'assistance à la navigation	113
4.3.1	Introduction aux moteurs 3D	113
4.3.2	Les données géographiques	116
4.3.3	Création de l'environnement	117
4.3.4	La gestion des interactions	118
4.3.5	Modélisation du comportement de l'utilisateur	122
4.3.6	Modélisation de l'erreur de positionnement	122
4.4	Conception des bracelets vibrants	123
4.4.1	Choix de conception possibles	123
4.4.2	Protocole	125
4.4.3	Déroulement	126
4.4.4	Résultats	126
4.5	Évaluation des stratégies de suivi	127
4.5.1	Protocole expérimental	128
4.5.2	Résultats	132
4.5.3	Conclusion sur l'évaluation des stratégies	135
4.6	Discussion générale sur le simulateur	137
4.6.1	L'interaction dans SIMU4NAV	138
4.6.2	Modélisation des comportements	138
4.6.3	Environnement virtuel et sources de données	139
4.7	Conclusion	139

Dans ce chapitre nous présentons l'implémentation d'un environnement virtuel interactif multimodal (SIMU4NAV) visant à évaluer de façon systématique les différents algorithmes et les stratégies de suivi et de guidage avant leur déploiement dans un système d'assistance à la navigation. Une première évaluation des différentes stratégies de suivi présentées dans le chapitre 3 est réalisée et discutée. SIMU4NAV peut aussi être utilisé pour des tâches d'apprentissage ou d'exploration d'environnements inconnus.

4.1 La réalité virtuelle

La réalité virtuelle peut être définie comme une interface homme-machine évoluée qui simule des environnements avec plus ou moins de réalisme et avec lesquelles les participants peuvent interagir [Ellis 1994]. Pour Fuchs [Fuchs *et al.* 2006], la finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne d'effectuer une activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel.

Si une certaine similarité entre les environnements virtuels et la réalité physique permet la création de contextes favorables à la réalisation d'actions, l'un des intérêts majeur de la réalité virtuelle réside dans la possibilité d'agir sur des paramètres habituellement inaccessibles ou d'introduire des informations inexistantes dans la réalité. La réalité virtuelle offre aussi la possibilité de simuler des tâches dans des environnements entièrement contrôlés ou les expérimentateurs maîtrisent un maximum de paramètres.

La réalité virtuelle se retrouve dans de nombreuses applications, par exemple la simulation de vol dans le secteur aéronautique ou militaire, ou des applications grand public comme les visites virtuelles des musées. La réalité virtuelle a été aussi utilisée comme support à la rééducation et à la suppléance pour plusieurs types de handicaps.

Dans le cadre de ce travail nous nous sommes intéressés aux apports de la réalité virtuelle pour étudier le comportement de navigation piétonne (wayfinding) pour les déficients visuels. Plusieurs travaux ont déjà été réalisés en exploitant cette technologie dans l'aide à la navigation.

4.2 La réalité virtuelle pour les déficients visuels

Avec l'importance croissante de la recherche sur les technologies de suppléance, plusieurs groupes de recherche se sont intéressés aux environnements virtuels (EV) comme plateforme d'apprentissage des compétences spatiales [Sánchez *et al.* 2009a]. Ces systèmes ont été développés pour assister l'acquisition de connaissances spatiales à partir d'interfaces tactiles ou auditives [Mereu & Kazman 1996]. Ils représentent un outil sécurisé permettant l'exploration et l'apprentissage autonomes d'espaces inconnus [Schloerb *et al.* 2010]. Généralement, ces systèmes sont conçus pour permettre aux déficients visuels d'explorer des espaces réels ou abstraits (par exemple, un labyrinthe), ainsi que d'interagir avec des objets au sein de ces espaces [Sánchez & Hassler 2006].

Il s'agit généralement d'environnements virtuels abstraits dans lesquelles les non-voyants se déplacent avec un joystick par exemple. Plusieurs travaux ont montré que le transfert de connaissance du monde virtuel vers le monde réel est possible avec des environnements virtuels assez minimalistes composés de formes géométriques simples [Peruch *et al.* 1995]. Pour [Lahav & Mioduser 2008], la navigation dans un environnement virtuel met en œuvre les mêmes processus cognitifs que la navigation réelle. L'interface de restitution de ces environnement peut être basée sur les modalités auditive [Sánchez & Hassler 2006], somesthésique, haptique ou sur plusieurs modalités combinées [Schloerb *et al.* 2010], [Sánchez & Tadres 2010], [Lécuyer & Mobuchon 2003]. La réalité virtuelle a été utilisée lors d'apprentissage d'utilisation de canne [Tzovaras *et al.* 2004] ou d'exploration des environnements inconnus [Sánchez *et al.* 2011].

Les environnements virtuels semblent donc un outil intéressant afin d'évaluer la robustesse des stratégies de suivi proposées dans le chapitre 3. Dans la suite de ce chapitre nous proposons de développer un environnement virtuel multimodal destiné à simuler le fonctionnement d'un système d'assistance à la navigation (tel que NAVIG). Il s'agit d'un

simulateur sur lequel nous pouvons effectuer, dans un environnement contrôlé et sûr, des évaluations en amont avant d'implémenter les meilleures solutions dans un système concret d'aide à la navigation. Nous illustrons l'utilisation de ce simulateur par l'évaluation des stratégies de suivi. En effet, cette alternative nous paraît intéressante vu les difficultés rencontrées lors de l'évaluation en situation réelle du système NAVIG.

4.3 SIMU4NAV : Un EV pour l'aide à la conception de systèmes d'assistance à la navigation

SIMU4NAV est une plate-forme de simulation de suivi d'itinéraire et de guidage pour préparer leur utilisation dans des conditions réelles avec des systèmes d'aide à la navigation pour DV. Cette plate-forme est développée en C++, avec OGRE comme moteur de rendu 3D. Les données géographiques sont extraites à partir d'OpenStreetMap, une base de données cartographique libre (voir section 2.4.1.1).

SIMU4NAV doit être capable de représenter d'une manière paramétrable des environnements réels (quartiers ou villes). Il doit aussi permettre à l'utilisateur de percevoir son mouvement propre (bruit de pas par exemple), de percevoir les éléments constituant l'environnement (perception « directe » des objets et « augmentation » des objets) ainsi que de percevoir des instructions assurant le guidage (pour les évaluations des stratégies de suivi).

Dans ce qui suit nous présentons les différents choix techniques auquel nous avons procédé ainsi que les étapes de développement de ce simulateur.

4.3.1 Introduction aux moteurs 3D

Il existe deux principales bibliothèques graphiques (API) pour réaliser des applications 3D bénéficiant d'une accélération matérielle : Direct3D et OpenGL. Ce sont deux bibliothèques de rendu qui fournissent un ensemble de fonctions permettant de gérer l'affichage d'objets en trois dimensions, en s'appuyant sur les fonctionnalités offertes par les cartes graphiques.

- Direct3D est une API propriétaire de la série DirectX de Microsoft. Celle-ci permet de faire du rendu 3D en temps réel et est très utilisée dans le développement de jeux vidéo.
- OpenGL est une API libre et multiplateforme développée historiquement par Silicon Graphics. Elle est utilisée dans la majorité des applications scientifiques, industrielles ou artistiques 3D, mais aussi dans le domaine du jeu vidéo où elle est souvent en concurrence avec Direct3D.

Un moteur 3D est une surcouche haut-niveau pouvant utiliser des bibliothèques graphiques telles que Direct3D¹ ou OpenGL² de manière transparente pour le programmeur et l'utilisateur final. Il fournit un ensemble de classes dont le but est d'optimiser le rendu tout en simplifiant la tâche des développeurs. Le moteur 3D est donc une interface entre le système d'exploitation et les bibliothèques graphiques dont l'utilisation ne peut être qu'avantageuse dans le cadre de ce travail. La figure 4.1 représente le fonctionnement entre l'utilisateur, le moteur 3D, les bibliothèques graphiques et la carte graphique.

Pour simuler un environnement virtuel dans lequel des interactions sont possibles avec les objets, il faut ajouter un moteur physique au moteur 3D. Un moteur 3D (également appelé moteur graphique) n'est chargé que de l'affichage à l'écran, c'est-à-dire le « rendu

1. Direct3D : <http://msdn.microsoft.com/en-us/directx/default.aspx>

2. OpenGL (Open Graphics Library) : <http://www.opengl.org/>

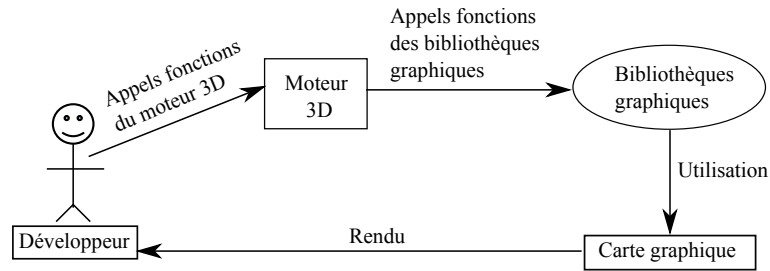


FIGURE 4.1 – Position du moteur 3D par rapport au développeur et à l'utilisateur.

» de la scène. Un moteur physique sert à simuler les lois de la physique telles que la gravité, l'inertie ou les frictions. Il aide également à détecter et à gérer les collisions entre les différentes entités qui composent un environnement 3D.

Un moteur complet pour réaliser un jeu par exemple est constitué d'un moteur graphique, mais peut également comprendre un moteur physique, un moteur audio, des outils de gestion de réseau, etc.

Un moteur 3D permet donc à des développeurs de réaliser plus efficacement et plus simplement une application 3D, sans être pour autant expert en développement 3D. Il nécessite cependant une bonne maîtrise du langage de programmation avec lequel le moteur a été développé. Dans le cadre de ce travail, l'environnement virtuel sera dédié aux non-voyants et l'affichage graphique servira principalement au contrôle du bon déroulement des sessions de test par les expérimentateurs. La qualité du rendu est donc secondaire et ne sera pas parmi nos priorités.

4.3.1.1 Étude des principaux moteurs 3D

Le choix du moteur 3D peut avoir un impact majeur sur les possibilités de développement dans de futures expérimentations. A terme, le but étant de développer une plate-forme de simulation qui sera utilisée pour évaluer de façon systématique les différents choix de suivi et/ou de guidage, il est nécessaire de choisir un moteur 3D à la fois ouvert, puissant et facile à aborder. Nous présentons ici un survol des principaux moteurs 3D existants pour justifier les choix réalisés.

Le moteur 3D Irrlicht. Irrlicht³ est un moteur 3D résultant d'un projet autrichien ayant débuté en 2002. C'est un moteur libre et multiplateforme, c'est-à-dire qu'il fonctionne à la fois sous Windows, Linux et Mac. Il est codé en C++ et est complètement orienté objet, ce qui lui permet d'être intuitif et très bien organisé. Il gère beaucoup de formats de fichiers (images, modèles 3D, archives, etc.) ce qui permet d'éviter le recours à des plugins externes. Il gère nativement des effets graphiques qui peuvent être très utiles comme la génération de terrains, les systèmes de particules, etc. Il est configurable pour utiliser les API OpenGL ou DirectX, ce qui augmente sa portabilité.

Le moteur 3D OGRE. OGRE⁴ (Object-oriented Graphics Rendering Engine) est né en 1999 suite à l'idée de créer un moteur 3D indépendant de la plateforme et de l'API utilisées. C'est également un moteur 3D libre et gratuit qui est très utilisé aujourd'hui à la fois pour des projets amateurs notamment axés sur les jeux vidéo mais aussi pour des projets commerciaux. Il s'agit avec Irrlicht des deux moteurs 3D les plus utilisés dans le

3. Site officiel d'Irrlicht : <http://irrlicht.sourceforge.net/>

4. Site officiel d'OGRE : <http://www.ogre3d.org/>

monde. Son principal inconvénient est sa difficulté d'intégration et son principal avantage est sa robustesse et sa complétude. Bien qu'il ne soit pas évident à prendre en main au départ, il est néanmoins très bien documenté et dispose d'une communauté importante et très active. Il est également très modulaire grâce à son système de plugins qui permet d'utiliser le strict nécessaire.

Crystal Space. Crystal Space⁵ est un kit de développement logiciel (SDK) utile pour la création d'applications 3D. Il est également libre, multiplateforme et modulaire (système de plugins). Il est utilisé notamment pour la production de jeux vidéo. Pour la 3D, il ne peut utiliser qu'une seule bibliothèque graphique : OpenGL, ce qui est un inconvénient majeur.

OpenSceneGraph. OpenSceneGraph⁶ est également un kit de développement utilisé par les développeurs d'applications 3D dans les domaines tels que la simulation, les jeux vidéo, la réalité virtuelle ainsi que pour la visualisation scientifique et la modélisation. Entièrement écrit en C++ et OpenGL, OpenSceneGraph est multiplateforme, il fonctionne en effet sur tous les systèmes d'exploitation majeurs. Il dispose d'une communauté moyennement active, mais possède le même inconvénient que Crystal Space, à savoir une gestion limitée à la seule bibliothèque OpenGL.

4.3.1.2 Choix du moteur 3D

Dans un premier temps OGRE et Irrlicht ont tous les deux été présélectionnés. Tous les deux sont orientés objet et ont été développés en C++, le langage choisi pour implémenter le simulateur. Ils sont multiplateformes et supportent aussi bien la bibliothèque graphique Direct3D qu'OpenGL. Notre choix final s'est porté sur OGRE pour ces différentes raisons :

- OGRE intègre mieux le concept de programmation orientée objet qu'Irrlicht du point de vue de l'architecture logicielle, compte tenu de l'agencement de ses nombreuses classes (environ 3 fois plus complet qu'Irrlicht) et de l'utilisation d'espaces de noms (namespace) permettant d'offrir une grande liberté aux développeurs.
- L'API d'Irrlicht est bien moins fournie que celle d'OGRE, tant en terme de fonctionnalités que de documentation. Ils peuvent tous les deux être interfacés avec des applications en C++, Java, Python et bien d'autres.
- La communauté d'OGRE est plus importante que celle d'Irrlicht. De nombreux sites internet lui sont consacrés, la documentation est très soignée et la communauté est très active sur les forums dédiés.

OGRE utilise la méthode du graphe de scène pour l'agencement des entités dans la scène 3D. Un graphe de scène est un graphe de type arbre composé de nœuds pouvant avoir plusieurs fils mais n'ayant qu'un seul parent (aucun pour la racine de l'arbre). Ainsi, un effet appliqué sur un nœud parent se répercute sur tous les nœuds descendants, par exemple une rotation, une translation ou une mise à l'échelle. Cette organisation des objets de la scène est très pratique car elle permet d'appliquer une transformation à un groupe d'objets en une seule opération. OGRE permet d'appliquer des textures sur des objets très facilement. Un langage de description des matériaux permet leur gestion en dehors du code source de l'application. Il s'agit d'un script très facile à lire pouvant gérer les textures multiples ainsi que l'animation des textures sur un objet.

5. Site officiel de Crystal Space : http://www.crystalspace3d.org/main/Main_Page

6. Site officiel d'OpenSceneGraph : <http://www.openscenegraph.org/>

C'est donc le moteur 3D OGRE qui a été choisi pour modéliser et afficher à l'écran l'environnement virtuel. Les utilisateurs finaux étant des DV, le rendu visuel sert uniquement à l'expérimentateur pour suivre les actions de l'utilisateur. Afin de construire des environnements virtuels correspondant au maximum à la réalité, nous avons choisi d'utiliser des données géographiques extraites à partir d'un SIG. Cela nous a permis d'avoir une correspondance entre les environnements virtuel et réel.

4.3.2 Les données géographiques

Afin d'ouvrir ce simulateur sur d'autres projets dans le futur et ne pas s'attacher à un SIG commercial, nous avons décidé d'utiliser une source de donnée libre. Notre choix s'est porté sur OpenStreetMap. OpenStreetMap se présente comme une carte du monde entier librement modifiable, compilée à partir d'informations renseignées par des particuliers. Ce service libre et gratuit permet ainsi de récupérer des données géographiques sur n'importe quel endroit du globe. La base de données géographique offerte par OpenStreetMap se distingue des autres car elle est :

- D'une grande richesse d'éléments selon l'endroit (bâtiments, parkings, restaurants, routes, etc.)
- Libre et modifiable ;
- Dotée d'une grande communauté très active ;
- Facile d'utilisation, par exemple pour extraire une zone géographique définie sous la forme d'un fichier xml.

Mettre à jour les données sur OSM est un processus assez simple comparé à ceux proposés par les autres bases de données. Deux solutions existent.

- En ligne, directement sur le serveur OSM
- En téléchargeant les informations d'une zone géographique donnée et en les modifiant en local avec un éditeur (JOSM) mis à disposition par la communauté.

Sur le site d'OpenStreetMap, il est donc possible d'extraire les informations appartenant à une zone sélectionnée par l'utilisateur dans un fichier structuré au format XML. Ce fichier est éditable dans JOSM pour rajouter ou enlever tous types d'informations. Ce fichier contiendra donc l'intégralité des données qui serviront à reconstruire l'environnement virtuel 3D. L'exportation des données du SIG au format XML est visualisable sur la figure 4.2.



FIGURE 4.2 – Processus d'extraction d'une zone à partir d'OSM sous forme d'un fichier XML.

Le format XML a été choisi car c'est un langage balisé très bien organisé, facile à comprendre et à utiliser. De plus, de nombreuses bibliothèques existent aujourd'hui pour parcourir efficacement des fichiers au format XML, ce qui sera très utile par la suite.

4.3.3 Création de l'environnement

Afin de construire l'environnement à partir des données du SIG, il a été nécessaire de convertir les coordonnées géographiques sphériques en coordonnées cartésiennes (XYZ). Cette transformation de coordonnées ne correspond pas juste à une projection des coordonnées sphériques sur un espace euclidien puisque des paramètres plus complexes comme l'aplatissement de la Terre interviennent.

Les différents objets de l'environnement virtuel sont extraits du fichier XML auquel nous avons rajouté les éléments spécifiques à la navigation piétonne. Après avoir effectué la conversion en coordonnées cartésiennes de chaque sommet du bâtiment, nous les parcourons deux à deux afin de créer pour chaque arête du polygone un plan vertical (figure 4.3). Dans cette première version les bâtiments et les obstacles sont représentés avec des hauteurs fixées arbitrairement.

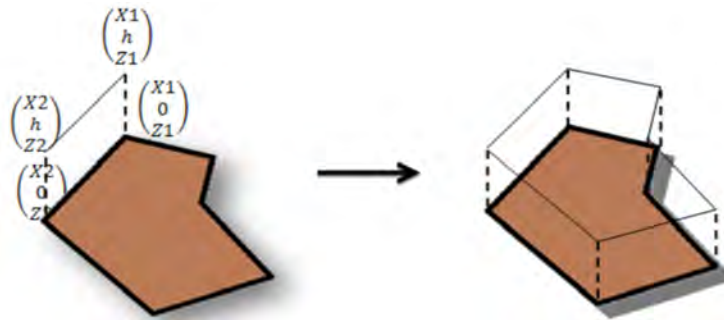


FIGURE 4.3 – Représentation d'un bâtiment dans l'environnement virtuel.

Pour chaque arête du polygone, le tracé de deux plans confondus est indispensable pour que chaque mur soit visible de part et d'autre de celui-ci car un plan n'a qu'une seule normale dans l'environnement 3D créé. La direction de la normale au plan indique le côté du plan pour lequel il sera visible. L'équation d'un plan se calcule à partir de :

- sa normale : produit cartésien normalisé de deux vecteurs non colinéaires du plan ;
- un point appartenant au plan.

Un mur est donc l'ensemble de deux plans superposés ayant deux normales opposées, sur lequel nous rajoutons une texture pour accentuer le réalisme de l'environnement. Comme pour la création des bâtiments, les chemins sont également représentés comme des coordonnées de segments 2D dans le fichier XML.

Les différents éléments spécifiques à la navigation piétonne rajoutés dans le fichier XML sont aussi extraits et représentés de la même façon que les bâtiments et les chemins. Afin que l'expérimentateur puisse contrôler ce que le non-voyant est en train d'effectuer pendant la navigation, nous avons décidé d'intégrer à la vue expérimentateur un radar permettant de visualiser par au-dessus la position actuelle de l'utilisateur. La position courante de la caméra (correspondant à la position de l'avatar) est représentée dans le radar par un point rouge. Un aperçu de l'affichage du simulateur est présenté par la figure 4.4. La qualité et le réalisme des différentes textures utilisées ne sont pas importants étant donné que l'environnement sera exploré sans retour visuel ; elles permettent cependant à l'expérimentateur de mieux se repérer le long du trajet.

La création d'un radar a nécessité l'ajout et la gestion d'une caméra que nous appellerons « caméra radar » (figure 4.5). Celle-ci est toujours située au-dessus de la caméra de la scène afin que la position de l'utilisateur soit toujours au centre du radar. Lorsque l'utilisateur effectue une rotation, la caméra radar effectue la même rotation pour que la direction de déplacement soit toujours la direction « nord » dans le radar. Il est également

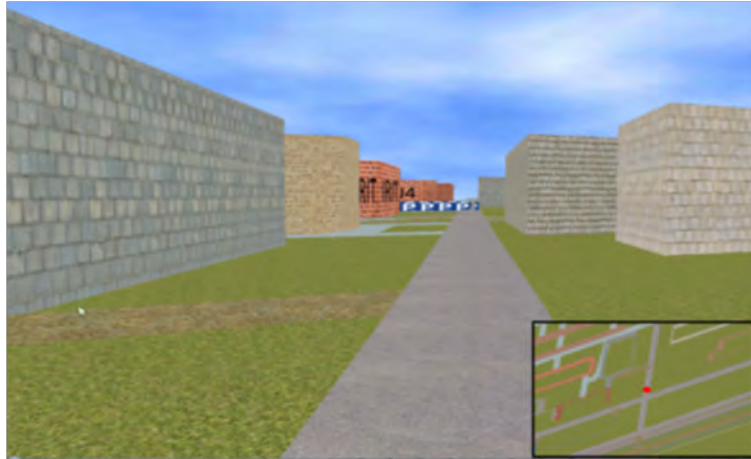


FIGURE 4.4 – Vue d'ensemble de l'affichage offert par le simulateur.

possible d'afficher le radar en plein écran pour avoir une meilleure visualisation.

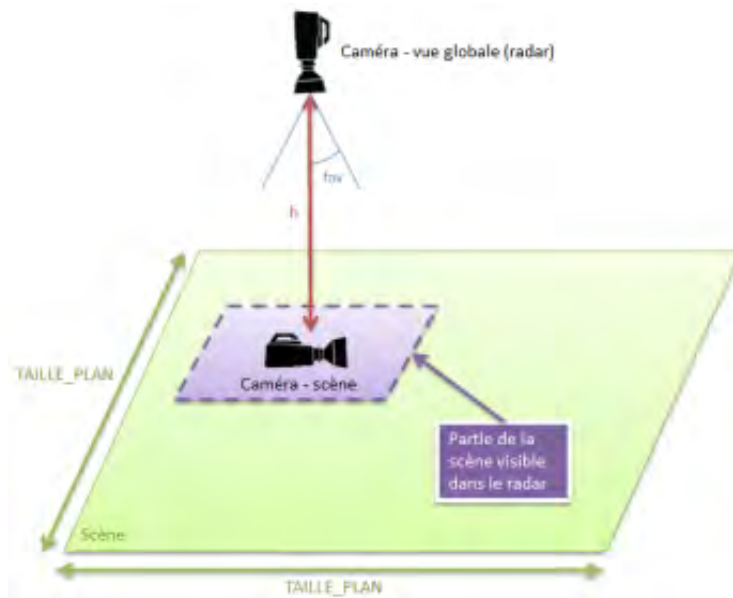


FIGURE 4.5 – Représentation de la vue radars.

Afin de détecter les collisions, nous avons utilisé la technique du lancer de rayons. La gestion des collisions est un processus très important. En effet, une personne déficiente visuelle qui navigue virtuellement dans l'environnement ne doit pas pouvoir circuler partout et doit être averti dès qu'elle entre en collision avec un objet ou un mur.

4.3.4 La gestion des interactions

Une fois l'environnement créé, nous nous sommes focalisés sur la gestion des interactions. Cette partie est importante car l'absence de perception visuelle implique l'utilisation d'une ou plusieurs autres modalités pour fournir un retour sensoriel à base de sons (modalité auditive), de vibrations et de forces (modalités somesthésique et/ou haptique).

La première manière de naviguer dans l'environnement virtuel est la méthode classique alliant la souris pour l'orientation de la vue (orientation de la caméra), et le clavier pour le déplacement dans les quatre directions habituelles. Il s'agit du moyen de navigation

classique utilisé dans les jeux vidéo. Il est également possible de naviguer uniquement grâce au clavier en attribuant aux flèches directionnelles droite et gauche le rôle de la souris pour effectuer la rotation autour de l'axe vertical. Bien que ce soit la méthode la plus simple pour naviguer dans un environnement, plusieurs travaux ont montré que l'utilisation d'un joystick par un déficient visuel pour la navigation dans un environnement virtuel pouvait être mieux adaptée [Katz & Picinali 2011].

4.3.4.1 La modalité auditive

L'objectif étant de créer, en premier lieu, un simulateur pour NAVIG, il fallait intégrer les mêmes techniques de guidage que celles utilisées en réel. Nous nous sommes donc attachés à reproduire les capacités de synthèse de texte et de génération de sons spatialisés implémentées dans NAVIG. L'utilisation de la TTS dans un environnement virtuel passe par l'utilisation d'un synthétiseur qui se charge de lire des messages textes générés par l'application. Cette technique est utilisée pour présenter des informations à l'utilisateur (distance, nom des obstacles, etc). Pour la spatiation, plusieurs travaux antérieurs ont démontré la faisabilité d'un guidage avec les sons spatialisés dans les environnements virtuels [Sánchez *et al.* 2009b]. La spatiation artificielle d'un son implique la modulation des délais et de l'amplitude des signaux destinés aux enceintes ou aux écouteurs d'un casque stéréophonique. Plus précisément, les programmes qui pilotent le rendu sonore jouent sur la différence de temps d'arrivée et la différence d'intensité entre les deux oreilles, ainsi que le filtrage fréquentiel des sons présentés à chacune des oreilles.

Les systèmes de spatiation du son les plus simples et les plus utilisés sont stéréophoniques, c'est-à-dire qu'ils comportent deux hauts parleurs et permettent ainsi des variations de perception des azimuts des sources selon un axe droite-gauche [Katz & Picinali 2011]. La différenciation devant/derrière ainsi que l'information sur la distance restent difficilement perceptible [Parseihian 2012]. Ainsi, si un son est situé dans l'axe de l'utilisateur, mais dans la direction opposée, il faudra utiliser un moyen d'indiquer à l'utilisateur qu'il ne se dirige pas dans la bonne direction.

Dans SIMU4NAV, nous avons implémenté une interface équivalente à celle de NAVIG. Nous avons utilisé l'API OpenAL qui est libre et permet à la fois de gérer les sons 2D et 3D. Cette API permet de gérer de nombreuses propriétés sonores comme la réfraction, la réverbération, les échos, l'atténuation du son en fonction de la distance entre la position de l'écouteur et la source sonore, etc. Afin de reproduire au mieux les conditions réelles, nous avons rajouté un ensemble de feedbacks sonores. Les bruits de pas diffèrent selon le type de revêtement (gazon, trottoir ou terre). Un moteur de synthèse vocal a aussi été ajouté. Il permet d'annoncer les collisions ainsi que les informations environnementales sur la présence de POI ou de PR.

Pour les sons spatialisés, et afin de différencier l'ambigüité devant/derrière, nous avons choisi de jouer un son différent dans le cas où le son est situé devant et dans le cas où il est situé derrière. L'information sur la distance est donnée en augmentant le volume quand on s'approche de la destination.

4.3.4.2 La modalité kinesthésique

Biggs et Srinivasan [Biggs & Srinivasan 2002] définissent les interfaces haptiques comme des mécanismes permettant à leurs utilisateurs de toucher, ressentir et manipuler des objets simulés au sein d'environnements virtuels. Ces interfaces produisent des simulations tactiles ou des retours de forces [Vitense *et al.* 2002]. Ces retours sont généralement réalisés à travers des moteurs électriques à courant continu. Dans la littérature, l'utilisa-

tion de la modalité haptique dans les environnements virtuels destinés aux non-voyants a souvent été assurée par le dispositif Phantom Omni. Il s'agit d'un bras articulé permettant d'exercer des forces dans trois directions, et qui possède six degrés de liberté en entrée (figure 4.6). D'autres travaux ont utilisé un joystick [Lahav & Mioduser 2008] à retour de force.



FIGURE 4.6 – L'utilisation du périphérique Phantom Omni dans «BlindAid», un environnement virtuel multimodal pour non-voyants [Schloerb *et al.* 2010].

Nous avons implémenté la gestion d'un joystick à retour de force dans SIMU4NAV. Le joystick Logitech Force 3D qui a été choisi nous a permis de rajouter différents types d'interactions. En effet différentes vibrations peuvent être affectées à différents événements comme par exemple des vibrations lors d'une collision ou bien lors d'une déviation par rapport à l'itinéraire. Les premiers pré-tests avec le joystick à retour de force n'étaient pas concluants. Les forces appliquées n'étaient pas assez importantes, surtout vis à vis du recentrage du manche (permettant de maintenir le manche droit lorsqu'on ne le pousse pas). Nous avons mis en place la possibilité d'intégrer ce type d'interactions ; cependant le joystick ne sera pas retenu comme moyen d'interaction dans l'expérience présentée ci-dessous.

Ces interfaces bien qu'intéressantes et efficaces lors de la navigation dans un environnement virtuel, ne permettent pas une utilisation en mobilité. Elles ne peuvent donc pas être associées à l'interface sonore de NAVIG. Il fallait également disposer d'une interface simple qui permette à l'utilisateur de garder une ligne droite, ce qui n'était pas possible avec le joystick.

Pour résoudre ces problèmes, nous avons ajouté la possibilité d'utiliser des bracelets vibrants dans SIMU4NAV (voir figure 4.7). A notre connaissance, cette interface n'a pas été proposée dans la littérature. Nous ne connaissons pas de travaux qui ont utilisé cette technique de rendu dans une tâche de navigation virtuelle pour non-voyants. Une étude exploratrice s'est donc imposée pour permettre la configuration des différents paramètres pour l'utilisation optimale de cette interface (Section 4.4).

4.3.4.3 Éditeur d'interaction

Afin de tester rapidement plusieurs conditions expérimentales, nous avons créé une interface permettant de changer rapidement la correspondance entre les types d'instructions/événements et leurs feedbacks associés. La liste des couples événements-feedbacks est facilement modifiable au moyen d'une interface graphique. Il est possible de rajouter de

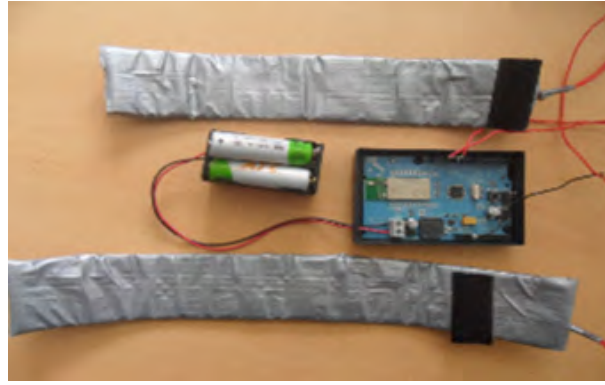


FIGURE 4.7 – Prototype de bracelets vibrants connectés en Bluetooth à une carte de contrôle Arduino.

nouveaux événements et de les associer à de nouveaux feedbacks. De cette manière, il est très facile de rajouter un feedback (comme une vibration d'un bracelet) ou un événement (comme une collision avec un bâtiment) et de les lier. La figure 4.8 présente l'interface de l'éditeur.

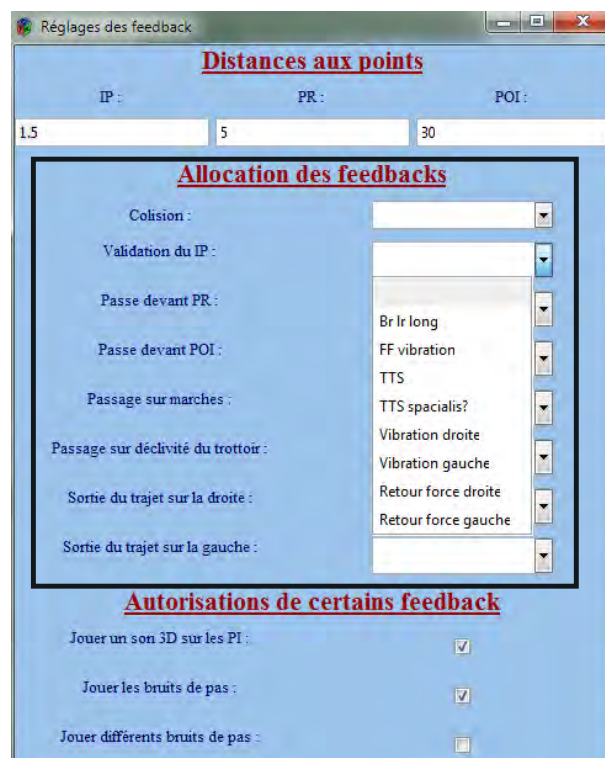


FIGURE 4.8 – L'éditeur d'interaction. Dans la partie encadrée, à gauche, nous avons les différents événements et à droite une liste déroulante qui contient les feedback prévus. Pour chaque événement un feedback peut être alloué.

Cet éditeur de couples événements-feedbacks permet de rendre le système très ouvert et de concevoir des protocoles expérimentaux très variés.

4.3.5 Modélisation du comportement de l'utilisateur

Afin de pouvoir utiliser le simulateur avec un maximum de réalisme, nous avons ajouté un modèle des comportements fréquemment observés chez les piétons déficients visuels. Le comportement le plus fréquent et le plus significatif correspond à une « dérive latérale ». Un piéton privé de vision (déficient visuel ou voyant les yeux bandés) qui cherche à avancer en ligne droite a du mal à garder un cap fixe et a tendance à dériver d'un côté ou de l'autre. Cette dérive peut être annulée grâce à des indices sensoriels fournis par l'arête d'un mur ou le bord d'un trottoir. Elle est par contre très importante dans un espace ouvert (comme une place). Dans ce modèle, nous avons intégré deux types de dérive, l'une angulaire imposant une légère rotation, et l'autre latérale imposant un léger déplacement sur le côté lorsque l'utilisateur avance. Le gain de la dérive peut être modifié selon les besoins. La figure 4.9 illustre cette dérive. Concrètement, en maintenant un appui long sur la flèche « haut » du clavier pour avancer, ou en inclinant le manche du joystick vers l'avant, le déplacement de l'avatar se fait avec une dérive aléatoire vers la droite ou la gauche.

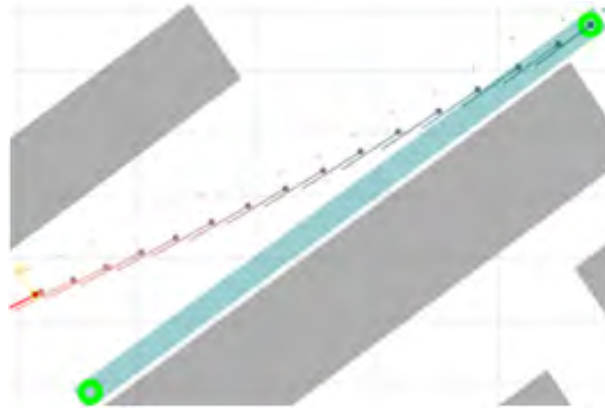


FIGURE 4.9 – Représentation d'un exemple de dérive. En avançant, le déplacement se fait avec une dérive aléatoire vers la droite ou la gauche. Les deux cercles verts sont deux points de l'itinéraire. Les flèches représentent la position et l'orientation de l'avatar. Les carrés gris représentent les bâtiments

4.3.6 Modélisation de l'erreur de positionnement

Le positionnement de l'avatar (sa position dans un cadre de référence donné) est parfait dans le simulateur. Mais en situation réelle, le positionnement est loin d'être précis, et cette imprécision est un facteur très important à prendre en compte lors de l'évaluation des stratégies de suivi. Pour se rapprocher au mieux des conditions réelles d'utilisation d'un système électronique d'aide à la navigation, nous avons rajouté une erreur de localisation dynamique qui modélise l'erreur de positionnement observable. Le modèle que nous proposons dérive de nos observations réalisées avec un positionnement de type GPS + centrale inertielle. Le principe consiste à injecter une erreur pseudo-aléatoire pour simuler un déplacement en conditions réelles. Pour cela, nous ajoutons une valeur aléatoire entre -90 et 90 degrés à l'orientation réelle. Un filtre de Kalman est appliqué sur cette orientation bruitée afin d'obtenir la nouvelle position bruitée. Lorsque l'avatar avance, sa position et son orientation sont modifiées en fonction des valeurs réelles auxquelles s'ajoute une erreur cumulative. Nous contenons l'erreur afin qu'elle ne dépasse pas un seuil fixé à l'avance. Cette technique permet d'avoir une erreur continue dans le temps ne dépassant pas le seuil

fixé. L'illustration 4.10 montre l'évolution de la localisation (croix) face à la position réelle (ronds) dans une section d'itinéraire.

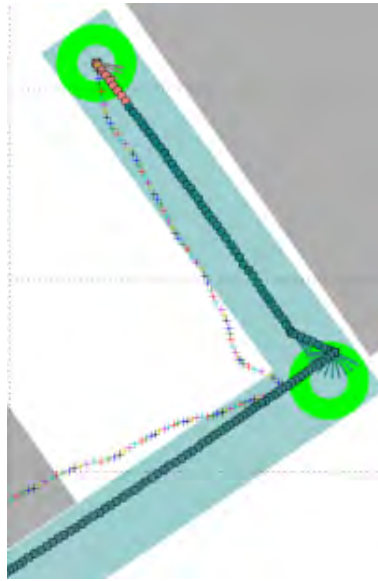


FIGURE 4.10 – Une représentation de l'erreur de positionnement. Les cercles verts sont les ponts de l'itinéraire. La trace en gras (succession de ronds) est la position exacte de l'utilisateur. La trace en pointillé est la position incluant l'erreur modélisée. Lors d'un test incluant la simulation d'un GPS, c'est la position bruitée qui sera utilisée.

4.4 Conception des bracelets vibrants

Afin de définir les différentes configurations de l'interface haptique utilisée, nous avons mené en premier une étude exploratoire. Cette pré-évaluation a été réalisée en collaboration avec Tiago Guerreiro, lors d'un séjour de 3 mois que j'ai effectué dans l'institut Supérieur Technique de Lisbonne, au Portugal. Nous avons implémenté cette interface tactile sur une carte Arduino Bluetooth. Cette carte est un composant électronique permettant de gérer des entrées/sorties analogiques et numériques. Sa programmation est possible grâce à un environnement de développement libre et gratuit fournis par le fabricant. Ce logiciel permet de coder dans un langage proche du C/C++ avec une bibliothèque très pratique pour gérer les entrées/sorties. Il permet de transmettre le programme à l'Arduino via une connexion Bluetooth série. La carte Arduino est vue comme un périphérique Bluetooth classique avec lequel il est possible d'échanger des messages.

Le Bluetooth est géré par Windows comme un port série classique ; nous avons donc développé une classe qui gère la connexion Bluetooth entre le simulateur et la carte arduino. Ce système fonctionnant en temps réel, nous pouvons associer des vibrations à chaque événement produit dans l'environnement virtuel. Dans chaque bracelet, nous avons placé un vibreur en disque de marque Solarbotics (VPM2) présenté par la figure 4.11.

Chaque bracelet contient un seul vibreur. Les deux bracelets sont ajustables en taille pour convenir aux poignets de l'utilisateur.

4.4.1 Choix de conception possibles

Dans cette section nous argumentons nos choix lors de la conception de l'interface tactile de SIMU4NAV.

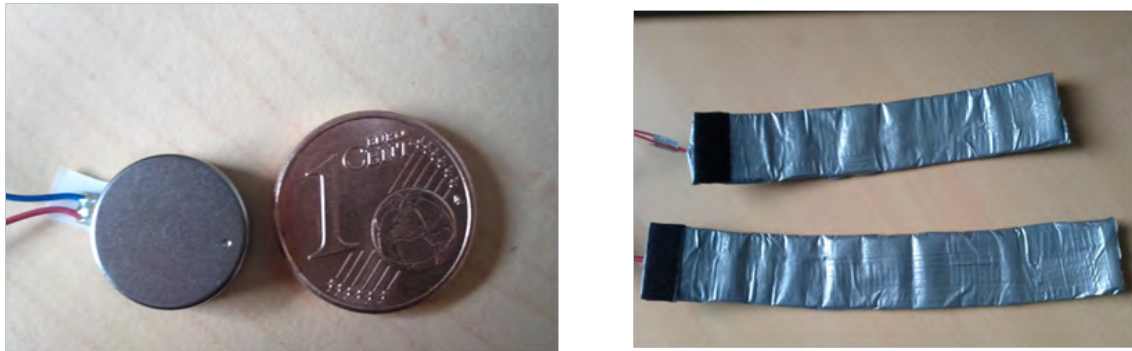


FIGURE 4.11 – A gauche, le vibreur utilisé. A droite les deux bracelets vibrants conçus.

4.4.1.1 Les patrons vibratoires

Lors de la navigation réelle, plusieurs travaux se sont intéressés à l'utilisation d'une interface haptique. Plusieurs interfaces ont été présentées, utilisant par exemple une ceinture avec 6 vibreurs [Heuten *et al.* 2008] ou 8 vibreurs [Van Erp *et al.* 2005]. [Ross & Blasch 2000] et [Srikulwong & O'Neill 2010] proposent une disposition sous forme de matrice de 12 vibreurs. Ces différentes interfaces sont proposées principalement à des personnes voyantes en situations d'interaction visuelle dégradées (les yeux fixant un autre écran) ou impossibles (vélo, randonnée, pluie, etc.). Ces interfaces restent jusqu'à maintenant des prototypes de laboratoire qui nécessitent un équipement particulier assez coûteux.

Une deuxième catégorie de système existe, profitant de la banalisation des smartphones, il s'agit d'applications de navigation offrant des instructions tactiles par le biais du vibreur intégré dans le téléphone. Le Pocket Navigator [Pielot *et al.* 2010] propose par exemple deux patrons composés chacun de deux vibrations, une courte et une longue pour différencier gauche et droite. L'azimut varie en fonction de la durée des deux vibrations comme présenté par la figure 4.12.

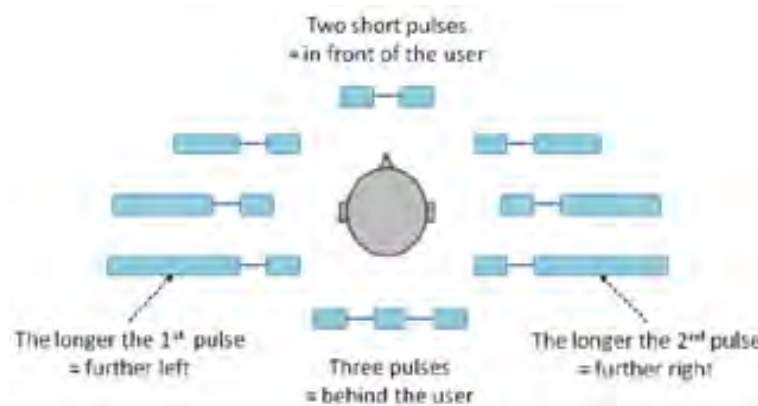


FIGURE 4.12 – Les différents patrons utilisés par le Pocket Navigator pour indiquer les directions. Figure extraite de [Pielot *et al.* 2010]

Ce choix, bien que pratique, pose la question de la charge cognitive nécessaire pour décoder les différentes instructions. De leur côté, [Rümelin *et al.* 2011] proposent le Navi-Radar, elle aussi une application qui exploite le vibreur du téléphone pour présenter les instructions. Cette application s'inspire du fonctionnement d'un radar.

Dans ce travail, nous voulions limiter le nombre de vibreurs utilisés, l'objectif étant de

concevoir une interface portable, qui pourrait être utilisé aussi bien dans un système virtuel que réel, pour donner des directions. Nous avons donc fait le choix de limiter le nombre de vibreurs à deux. Nous nous sommes inspirés des patrons proposés dans le système Pocket Navigator (Voir figure 4.13).

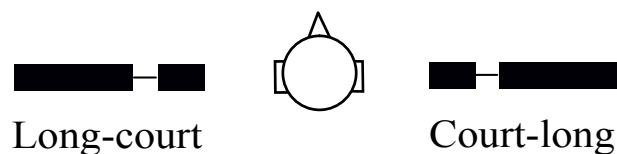


FIGURE 4.13 – Les deux patrons vibratoires utilisés dans notre étude.

Afin de minimiser la charge cognitive relative à l'interprétation des instructions tactiles, faut-il utiliser un seul bracelet avec deux patrons vibratoires différents ? Ou est-il mieux d'utiliser deux bracelets avec un même patron simple ?

Des éléments de réponses à cette question sont avancés suite à une première évaluation.

4.4.1.2 Métaphores possibles

L'utilisation de deux instructions gauche/droite pose une question assez intéressante sur la métaphore que nous devons utiliser. Deux choix conceptuels s'offraient à nous, avec pour enjeu principal la charge cognitive nécessaire à la compréhension des instructions fournies par l'interface tactile.

La première solution était d'utiliser une métaphore inspirée de l'utilisation de la canne (voir la figure 4.14) et appelée « mur ». Dans cette métaphore, la vibration simule un contact avec un « mur virtuel », ce qui suggère à l'utilisateur de s'orienter dans la direction opposée.

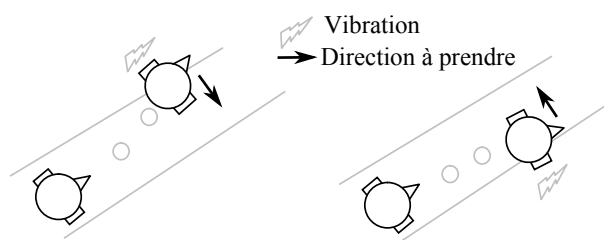


FIGURE 4.14 – Métaphore du "mur" : la vibration indique la direction de laquelle s'éloigner.

La deuxième solution possible est illustrée par la figure 4.15 et est nommée métaphore de « l'aimant ». Contrairement à la métaphore du « mur », la direction indiquée par les vibrations correspond à la direction vers laquelle l'utilisateur doit se diriger (comme si un aimant ramenait l'utilisateur vers le centre de la trajectoire).

Face à ce choix conceptuel qui pouvait avoir un impact important sur l'utilisabilité de l'interface proposée, nous avons réalisé une pré-étude expérimentale avec deux non-voyants. Dans la suite nous présentons son déroulement ainsi que les principaux résultats.

4.4.2 Protocole

Deux utilisateurs non-voyants ont participé à cette étude exploratoire. Une première phase de familiarisation avec les vibrations a été réalisée en amont dans nos bureaux. A la fin de cette phase, les deux utilisateurs étaient capables de différencier les 2 patrons choisis et d'adopter la bonne décision comportementale.

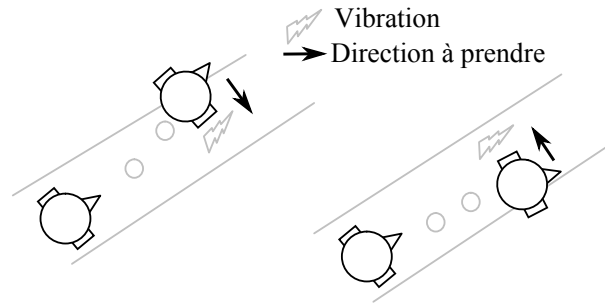


FIGURE 4.15 – Métaphore de "l'aimant" : la vibration indique la direction vers laquelle se diriger.

Une ligne droite de 40 mètres a été définie dans la zone de test (un parking vide). Nous avons tracé un couloir de 2 mètres de largeur centré sur cette ligne droite. L'utilisateur était équipé de deux téléphones accrochés sur ses poignets (les bracelets vibrants n'étaient pas encore conçus lors de cette pré-étude). L'expérimentateur était à côté avec un troisième téléphone qui pouvait envoyer via Bluetooth des commandes faisant vibrer sans délais les téléphones accrochés aux poignets de l'utilisateur (technique du magicien d'Oz). Une application clients/serveur sous Android a été réalisée pour gérer la communication entre les 3 smartphones.

Deux expérimentateurs supplémentaires étaient présents : un au point de départ et le deuxième au point de l'arrivée. L'utilisateur était placé face à la destination. La consigne était de marcher droit en essayant de garder le cap du mieux possible.

4.4.3 Déroulement

Les deux utilisateurs ont fait chacun 2 sessions : dans la première session l'utilisateur était équipé avec les deux téléphones, un à chaque poignet pour différencier les directions. Dans la seconde session il ne portait qu'un seul téléphone, et la différenciation entre les instructions gauche et droite se faisaient grâce à des patrons de stimulations différents.

Pour la deuxième session, nous avons choisi la configuration avec deux téléphones pour faire la comparaison entre les deux métaphores possibles « mur » et « aimant ». L'utilisateur effectuait une première fois le trajet avec l'approche « mur » puis une deuxième fois avec l'approche « aimant ». La figure 4.16 présente le déroulement d'une session avec un utilisateur non voyant.

4.4.4 Résultats

Nous présentons dans cette section les résultats préliminaires suite à cette étude. Ces résultats seront utilisés dans un deuxième temps pour paramétrer les bracelets vibrants utilisés dans l'évaluation des stratégies de suivi.

D'une manière générale, les deux sujets ont été plutôt favorables à l'utilisation de la métaphore « mur ». En effet cette approche est en parfaite adéquation avec leur formation en locomotion qui implique l'évitement d'un obstacle détecté.

Par ailleurs, les deux utilisateurs étaient plutôt favorables à l'utilisation des deux téléphones avec un patron simple plutôt qu'un seul téléphone avec deux vibrations. Nous avons notamment pu constater à plusieurs reprises que, lors de la réalisation de l'itinéraire avec les deux patrons, les deux utilisateurs ont hésité avant de prendre la décision qui était parfois la mauvaise. Cela s'explique probablement par la charge cognitive nécessaire pour



FIGURE 4.16 – Déroulement de l'étude. L'expérimentateur suit le non-voyant et envoie les instructions lorsque l'utilisateur dévie. Un marquage au sol permet de voir si l'utilisateur dévie

interpréter le patron de vibration alors qu'ils sont déjà préoccupés par la tâche initiale de locomotion.

Cette étude exploratoire nous a permis de valider l'utilisation des bracelets vibratoires comme technique de suivi de ligne droite en l'absence de vision. Même si elle ne remplace absolument pas les informations obtenues par l'utilisation de la canne ou du chien, c'est une technique qui permet de suivre une ligne droite. La métaphore « mur » a par ailleurs démontré être plus utilisable que la métaphore « aimant ». Ces résultats permettent de faire un choix définitif dans la technique de suivi de ligne droite implémentée dans SIMU4NAV.

4.5 Évaluation des stratégies de suivi

Nous présentons dans la suite une évaluation des différentes stratégies de suivi présentées dans le chapitre 3. Cette évaluation aura comme objectif de montrer les performances des différentes stratégies proposées en les comparant par rapport à la stratégie du cercle virtuel. Comme présenté dans la section 3.6, il est assez difficile d'évaluer les performances de ces différentes stratégies en situation de navigation réelle (manque de précision, sécurité des utilisateurs, etc). Nous choisissons donc d'utiliser SIMU4NAV comme environnement de simulation.

Les évaluations ont été conduites avec 16 utilisateurs. Un premier groupe de 8 sujets utilisait exclusivement la modalité auditive lors du guidage (méthode des points d'itinéraire virtuels). Le deuxième groupe, composé lui aussi de 8 sujets, utilisait en plus de la modalité auditive, des instructions tactiles au moyen des bracelets vibrants.

L'utilisation des bracelets vibrants consiste en d'autres termes à rajouter un guidage sur la section (une section est une ligne droite). Le principe du suivi par section qui

permettait de déclencher des instructions tactiles a été présenté dans la section 4.4. Pour rappel, l'utilisateur est averti par des vibrations lorsqu'il dérive et sort de l'itinéraire prévu. Dans l'étude qui suit nous avons comparé les différents algorithmes de suivi lorsque l'utilisateur est guidé par des points d'itinéraire seulement (condition AUDIO) ou par une méthode mixte incluant les bracelets pour le guidage sur la section et l'audio 3D pour atteindre les points d'itinéraire (condition MIXTE).

4.5.1 Protocole expérimental

16 sujets âgés entre 22 et 48 ans (moyenne de 28,7 ans) ont participé à l'évaluation des différentes stratégies de suivi. Tous les utilisateurs présentaient une audition normale. Les 16 sujets ont été répartis en deux groupes de 8 sujets chacun. Le premier groupe utilisait exclusivement des sons spatialisés (condition AUDIO) alors que pour le deuxième groupe utilisait les bracelets vibrants en plus du son (condition MIXTE). Les sujets étaient privés de vision (bandeau sur les yeux) et étaient équipés avec les bracelets vibrants. La figure 4.17 présente un utilisateur du groupe 2 (avec bracelets) au moment d'effectuer le test.



FIGURE 4.17 – Un utilisateur lors d'une session d'évaluation. L'écran est dirigé vers l'expérimentateur qui suit la progression du sujet le long des différents itinéraires dans l'environnement 3D.

4.5.1.1 Rappel des stratégies de suivi évaluées

Au total 4 stratégies de validation de points d'itinéraires ont été implémentées et évaluées (voir section 3.6.2.2 pour les détails des sur les stratégies). Nous avons décidé de ne pas évaluer la stratégie de la bissectrice, car elle se rapproche de la stratégie « distances aux segments ». De plus cette dernière offre une zone de validation supplémentaire et intéressante du côté extérieur du virage. Nous avons choisi de comparer les 3 stratégies proposées par rapport à la stratégie plus « classique » du cercle virtuel. Dans la suite de ce travail nous utiliserons la notation suivante :

- S1 : stratégie du cercle virtuel
- S2 : stratégie de la distance aux droites
- S3 : stratégie de la distance aux segments
- S4 : stratégie par rapport à la projetée

L'affectation d'une stratégie à un itinéraire donné est faite aléatoirement. Nous veillons à ce que cette affectation soit contrebalancée entre sujets pour éviter les effets d'appren-

tissage.

4.5.1.2 Les itinéraires utilisés

Quatre itinéraires différents ont été définis pour tester les 4 stratégies de suivi sans avoir d'effet d'apprentissage du trajet. Les différents itinéraires sont de complexité similaire, assez longs pour obtenir suffisamment de mesures, mais pas trop pour que l'expérience ne soit pas trop éprouvante. Suite à une première phase de pré-tests, nous avons défini que les itinéraires répondraient aux caractéristiques suivantes :

- Chaque itinéraire contient 10 sections, une de 40 mètres, 5 de 25 mètres et 4 de 15 mètres. La longueur totale d'un itinéraire est de 225 mètres.
- Chaque itinéraire contient 9 changements de directions (virages), un virage à 0° (aller tout droit), un à 30° , deux à 60° , deux à 90° , deux à 120° et un à 150° .

Afin de nous concentrer uniquement sur la tâche de suivi, nous avons décidé dans un premier temps d'éviter les collisions. La zone sélectionnée est dépourvu de bâtiments (similaire à une grande place par exemple). À l'aide d'un script écrit sous Matlab, nous avons créé de façon pseudo aléatoire les 4 itinéraires décrits ci-dessus (figure 4.18). Ces itinéraires sont chargés l'un après l'autre au cours du test dans le simulateur et associés chacun à une stratégie de suivi. Cette association est différente d'un sujet à l'autre et contrebalancée sur l'ensemble des sujets.

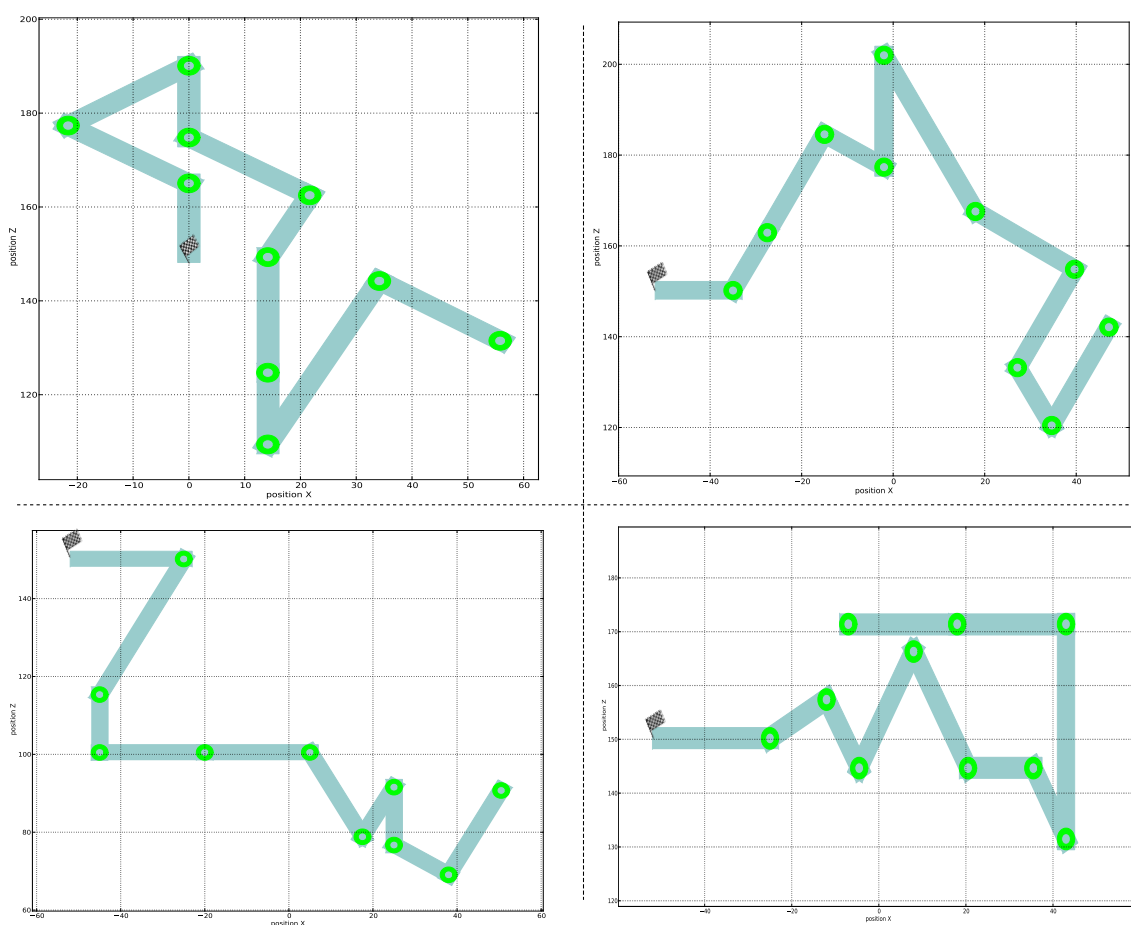


FIGURE 4.18 – Les quatre itinéraires choisis aléatoirement pour les tests.

4.5.1.3 Le guidage dans le simulateur

Pour évaluer la robustesse des différentes stratégies de suivi, il fallait être en mesure de guider l'utilisateur sur son itinéraire. Nous avons utilisé la même technique que celle proposée dans NAVIG, à savoir les sons virtuels indiquant successivement les points de l'itinéraire. Dans cette condition (AUDIO), un son spatialisé est émis par le point vers lequel l'utilisateur doit se diriger. Pour donner des informations sur l'environnement dans lequel l'utilisateur évolue, des informations concernant les PR et les POI son indiquées comme suit (voir figure 4.19) :

- Les points de repères (PR) indiquent des repères non visuels (auditifs ou tactiles) que l'utilisateur peut percevoir lorsqu'il se déplace (ex : les marches, le changement de revêtements du sol, etc.). Nous avons défini une distance d_{pr} pour annoncer ce type de point. Si l'utilisateur est à une distance de d_{pr} du PR, ce point est décrit par TTS spatialisée (le son provient du PR).
- Les points d'intérêt (POI) indiquent des objets ou lieux potentiellement intéressants (ex : bâtiments). Nous avons défini une distance d_{poi} pour annoncer ce type de point. Si l'utilisateur est à une distance de d_{poi} du POI ce point est annoncé par TTS spatialisée (le son provient du POI).

Ces différentes distances sont définies sur l'interface de lancement par l'expérimentateur. Dans ce test-ci, nous avons fixé d_{pr} à 5 mètres et d_{poi} à 50 mètres. Nous nous sommes inspirés des différents travaux de [Walker & Lindsay 2006], [Loomis *et al.* 1998] pour définir ces valeurs. Néanmoins leur importance et leurs conséquences de leur présence sur la navigation et la construction d'une image mentale de l'environnement pourraient être évaluées dans un test spécifique.

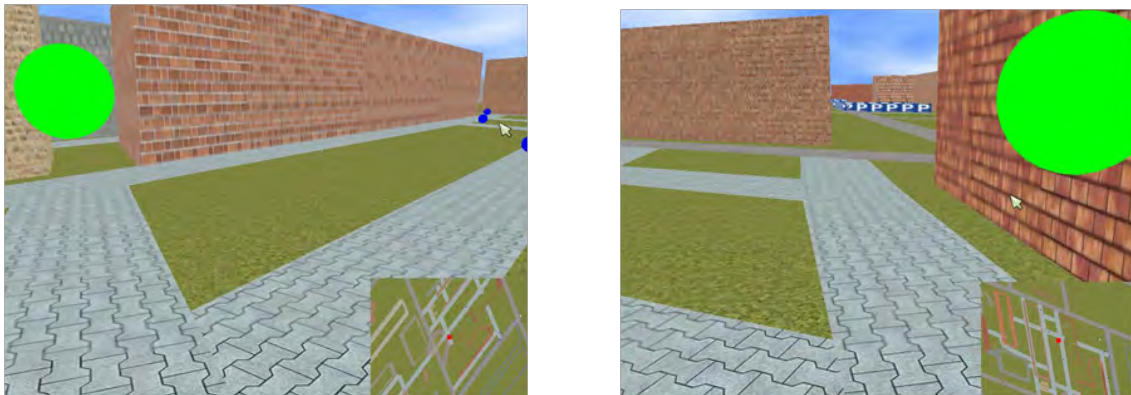


FIGURE 4.19 – Un exemple de guidage avec le simulateur. L'utilisateur doit se diriger vers la boule verte qui représente le prochain point d'itinéraire à atteindre. Image de gauche : le son est perçu à gauche. Image de droite : le son est perçu à droite. Les points bleus sont des points de repères (e.g. changement de revêtement) qui sont sonifiés lorsque l'utilisateur arrive à leur proximité.

Dans la condition MIXTE, nous avons ajouté des informations tactiles (bracelets vibrants) dans le but de fournir une information de guidage simulant l'utilisation de la canne ou du chien sur les sections (lignes droites). La configuration des bracelets est le résultat de l'étude exploratoire mentionnée plus haut. Ainsi, les bracelets vibrants sont au nombre de deux et sont configurés selon la métaphore du « mur » comme suit :

- Si l'utilisateur est à moins de 0,5 m du bord gauche (respectivement droit) de l'itinéraire (la largeur d'un itinéraire étant fixée par défaut à 4 mètres), alors une courte

vibration répétée toutes les 1,5 secondes, est transmise via le bracelet gauche (respectivement droit).

- Si l'utilisateur sort du couloir virtuel par le côté gauche (droit), alors une longue vibration répétée toutes les 0,75 secondes est transmise via le bracelet gauche (droit).

Ces vibrations informent l'utilisateur de sa position par rapport au couloir pour qu'il puisse corriger sa trajectoire en cas de déviation.

4.5.1.4 Familiarisation

Cette étape permet de s'assurer que les différents utilisateurs arrivent à se déplacer dans l'environnement sans problèmes particuliers et sont capables de se réorienter grâce aux sons spatialisés. Pendant une première phase d'une durée de 5 minutes et commune aux deux groupes, les utilisateurs sont équipés avec le casque audio, yeux bandés, et explorent librement l'environnement. Dans un deuxième temps, nous présentons à l'utilisateur un son spatialisé provenant d'un point dans l'environnement. Il doit alors se diriger vers ce point. Nous utilisons deux sons différents selon que les PI sont situés devant ou derrière l'utilisateur. Pour les utilisateurs du deuxième groupe (avec bracelets) une deuxième phase de familiarisation avec le retour tactile est réalisée. Nous présentons les bracelets en faisant quelques tests pour vérifier que leur fonctionnement est bien compris par le sujet.

4.5.1.5 Déroulement

Chaque sujet réalise au total 4 itinéraires avec une stratégie de suivi différente (S1 à S4) pour chacun. La session dure entre 40 minutes et 1h en fonction de la rapidité de l'utilisateur et de la condition (avec ou sans les bracelets). L'expérimentateur doit démarrer les parcours d'itinéraires l'un après l'autre. Quand l'utilisateur arrive au dernier point de son itinéraire, l'expérimentateur annonce le lancement de l'itinéraire suivant et le charge. Toutes les données issues d'une session d'évaluation sont enregistrées dans un fichier texte.

4.5.1.6 Variables observées

Un ensemble de mesures sur la globalité de l'itinéraire ont été réalisées :

- Distance Parcourue (DP) : longueur du trajet réellement effectué. Selon Golledge (Golledge, 1995), la distance est le premier critère lors de la sélection d'un itinéraire. En navigation humaine, et plus particulièrement pour les non-voyants, la longueur d'un itinéraire est également un facteur important.
- Temps de Parcours (TP) : temps mis par l'utilisateur pour parcourir l'itinéraire complet. Selon (Golledge, 1995), c'est le deuxième critère le plus regardé lors du choix d'un itinéraire.
- Distance Hors Trajet moyenne (DHT) : moyenne de la distance entre la position mesurée (trajet) et l'itinéraire à suivre. Cette moyenne est nulle (=0) si l'utilisateur reste parfaitement sur l'itinéraire.

De plus, nous faisons aussi des mesures autour des points d'itinéraire (ils correspondent à des points de réorientation). Nous considérons la section d'itinéraire située dans un rayon de 5 mètres autour du point de réorientation. Nous avons défini un ensemble de variables observées pour ces analyses autour des PI :

- TPR : Temps de Passage sur un point de Réorientation : c'est le temps écoulé dans le rayon de 5m autour du point de réorientation.
- DHTP : Distance Hors Trajet moyenne sur les Points de réorientations : c'est la

moyenne de la distance entre la position mesurée et l'itinéraire (=0 lorsque l'utilisateur reste sur l'itinéraire) constaté sur les 10 mètres autour d'un PI.

4.5.2 Résultats

Nous obtenons, pour chaque sujet, 4 fichiers différents correspondant aux 4 itinéraires effectués. Pour rappel, chaque itinéraire était associé à une stratégie de guidage différente (S1, S2, S3 et S4). La figure 4.20 présente un exemple des trajets parcourus par un des sujets. Nous proposons dans cette section une analyse des différents résultats collectés lors de cette évaluation.

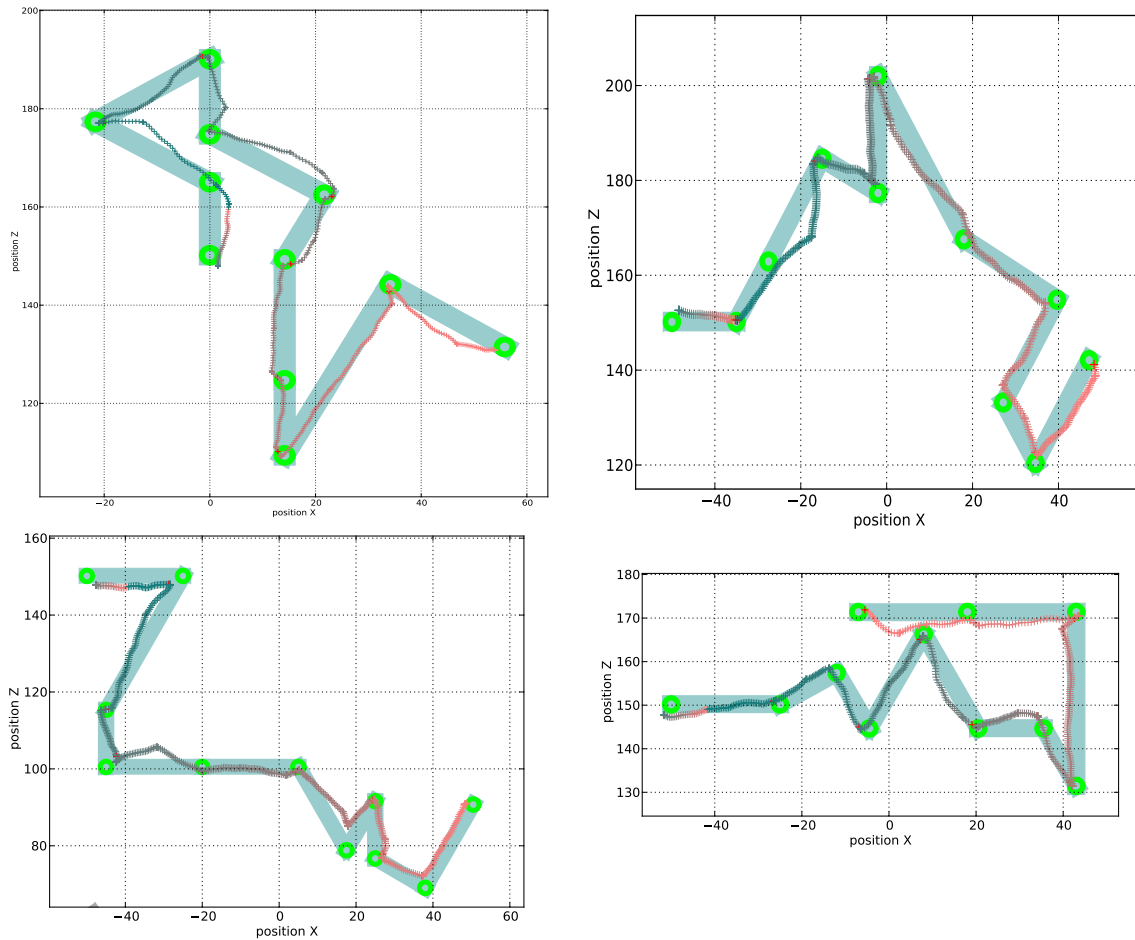


FIGURE 4.20 – Un exemple des quatre trajets réalisés chacun avec une stratégie différente par un utilisateur. Les cercles verts représentent les différents points d'itinéraire (aussi appelé points de réorientation). Ces points sont reliés entre eux par les différentes sections formant l'itinéraire. En pointillés, le positionnement global (avec erreur) utilisé par le système pour suivre le déplacement du sujet.

Toutes les analyses ANOVA ont été réalisées avec le logiciel Statistica et un seuil de significativité à 0.05. Nous avons utilisé dans toutes ces analyses un modèle statistique à deux facteurs avec les stratégies (S1, S2, S3, S4) comme premier facteur, et la condition (Audio/Mixte) comme deuxième facteur.

Nous avons cherché à mettre en évidence un éventuel effet des différentes stratégies sur les distances (DP, DHT, DHTP) et temps de parcours mesurés (TP, TPR), puis nous nous

sommes intéressé aux effets induit par l'utilisation des bracelets vibrants comme technique de guidage additionnel sur les sections (lignes droites).

4.5.2.1 Analyse des trajets

Nous avons réalisé un ensemble de tests statistiques pour évaluer les performances des 3 nouvelles stratégies de suivi proposées par rapport à la stratégie « classique » du cercle virtuel. Notre hypothèse est que la stratégie S1 (le cercle virtuel) est la stratégie la moins performante dans un contexte de navigation piétonne.

Dans un premier temps, nous nous présentons uniquement l'effet principal du facteur « stratégie ». Dans un deuxième temps nous présentons l'effet principal du facteur « condition » (AUDIO vs. MIXTE) afin de discuter l'utilisation d'un guidage sur section en plus du guidage audio par point d'itinéraire. A noter que toutes les variables mesurées présentent une distribution normale vérifiée avec un test de Kolmogorov-Smirnov.

Distance totale. Dans cette évaluation, nous nous intéressons à la distance totale parcourue par les sujets afin d'atteindre la destination finale. Pour les 16 sujets confondus, les distances parcourues sont significativement différentes selon les stratégies de suivi utilisées (Anova $F(3, 56)=5.8748$, $p=0,00147$) Les stratégies 2, 3 et 4 sont significativement différentes de la stratégie 1 d'après les tests post-hoc réalisés (LSD de Fisher). Il n'existe pas de différences significatives entre S2, S3 et S4. La figure 4.21 illustre les distances parcourues moyennes en fonction de la stratégie de suivi utilisée.

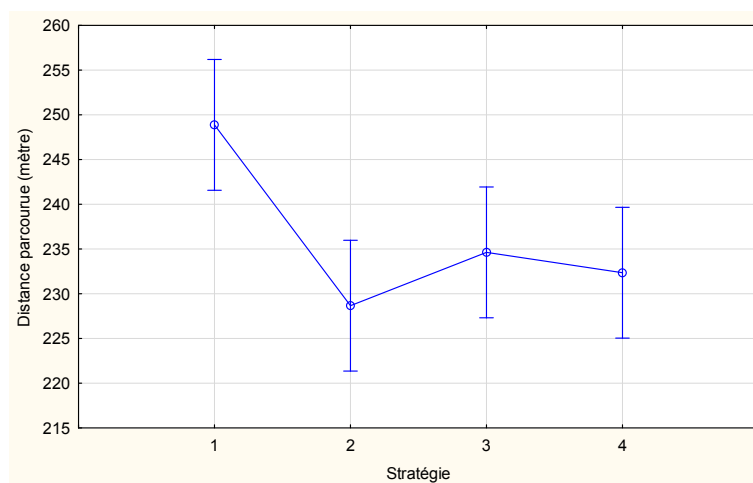


FIGURE 4.21 – Moyenne (pour les 16 sujets) de la distance parcourue sur l'ensemble du trajet en fonction des 4 stratégies. La distance totale parcourue est significativement plus élevée pour la stratégie S1 que pour les autres stratégies.

Temps de parcours. Le temps de parcours moyen correspond à la moyenne des temps mis par tous les utilisateurs pour réaliser un itinéraire, entre le point de départ et la destination finale. Nous rappelons que les itinéraires sont tous identiques en termes de distance, de nombre de changement de directions et de répartition des valeurs d'angles. Nous pouvons donc considérer tous les trajets ensembles. Ceci permet également de lisser les éventuels effets d'apprentissage qui pourraient survenir entre les différentes sessions (l'ordre de présentation des itinéraires est contrebalancé entre les sujets). La figure 4.22 présente la moyenne des temps de parcours réalisés avec les différentes stratégies de suivi.

Pour les 16 sujets confondus, le temps de parcours moyen diminue significativement entre les stratégies S2, S3 et S4 et la stratégie 1 (Anova : $F(3, 56)=5.2400$, $p=0,00294$). Cependant, les stratégies S2, S3, S4 ne sont pas significativement différentes en termes de temps de parcours d'après le test post-hoc réalisé (LSD de Fisher).

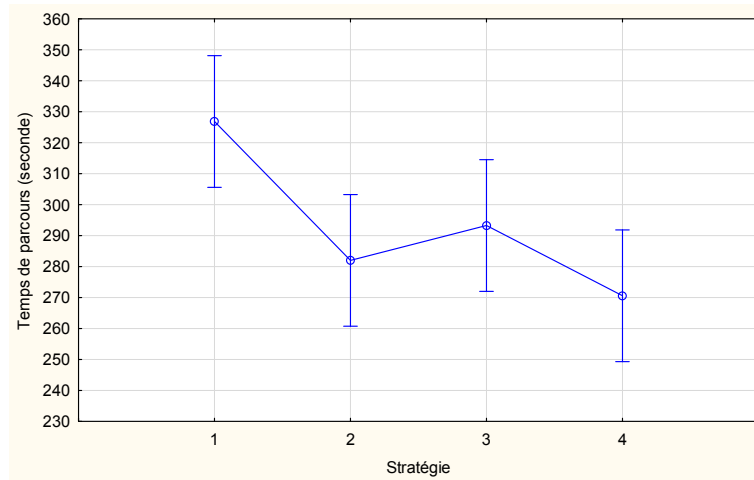


FIGURE 4.22 – Moyenne du temps de parcours (en secondes) pour l'ensemble des 16 sujets en fonction des 4 stratégies. Entre les stratégies 1 et 4. Le temps de parcours est significativement plus élevé pour la stratégie S1 que pour les autres stratégies.

L'analyse spécifique du temps passé autour des points de réorientation (TPR) confirme cette analyse. La figure 4.23 présente les différents temps passés dans les 10 mètres autour des points de réorientations. Nous pouvons constater que ce temps est significativement différent en fonction de la stratégie utilisée (Anova : $F(3, 568)=8.9294$, $p=0,00001$). Les résultats des tests post-hoc nous indiquent que la stratégie S1 présente des durées significativement plus longues que les 3 nouvelles stratégies utilisées. La stratégie S1 impose le passage dans un cercle, ce qui peut prendre plus de temps si le positionnement n'est pas assez précis, car il oblige les utilisateurs à tourner autour du point (figure 4.23).

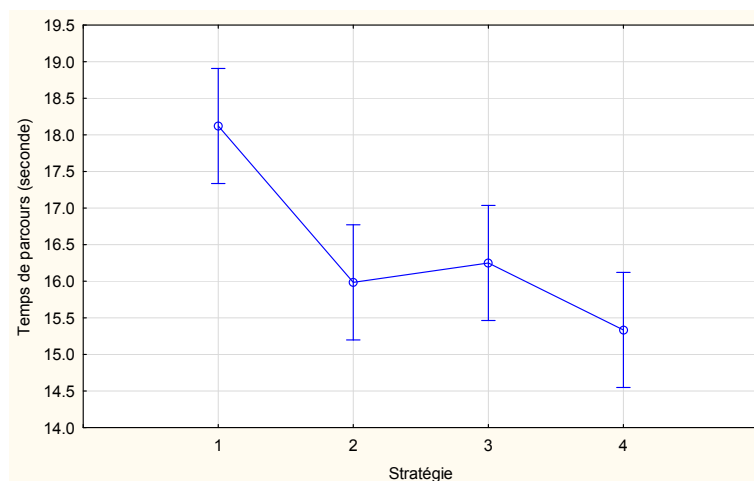


FIGURE 4.23 – Moyenne du temps de parcours autour des points de réorientations (en secondes) pour l'ensemble des 16 sujets en fonction des 4 stratégies. Entre les stratégies S1 et S4, le temps de parcours moyen autour des virages décroît significativement.

Cette première analyse globale permet de mettre en évidence les avantages des dif-

férentes stratégies de suivi proposées. Outre le gain en distance parcourue, les nouvelles stratégies de suivi permettent de diminuer le temps passé pour valider les points de réorientations.

4.5.2.2 Effet des bracelets vibrants

Dans cette deuxième partie de l'analyse, nous essayons de comprendre l'intérêt potentiel d'avoir un guidage additionnel sur les sections du parcours. Ce guidage est assuré par les bracelets vibrants comme décrit dans la section 4.4. Nous faisons l'hypothèse que l'utilisation d'un guidage par section optimise le trajet par rapport à l'itinéraire et aura donc des conséquences bénéfiques lors du déroulement de la tâche de navigation.

Distance totale. L'utilisation d'un suivi par section au moyen des bracelets vibrants a un effet sur la distance parcourue Anova $F(3,56)=2.0721$, $p=0,0000$ (voir figure 4.24). Pour les 4 stratégies de suivi, l'utilisation de bracelets engendre une distance supplémentaire. Cette distance correspond à la distance parcourue pour revenir sur l'itinéraire.

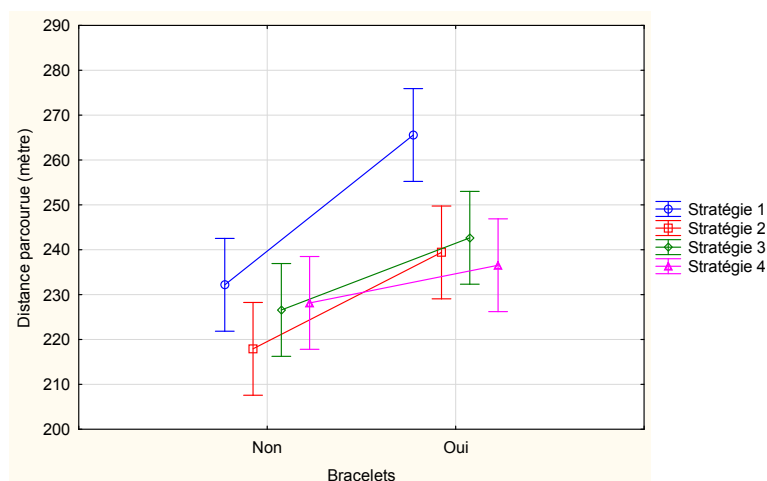


FIGURE 4.24 – Moyenne des distances parcourues par stratégie de suivi selon l'utilisation ou non du retour haptique avec les bracelets.

Temps de Parcours. La figure 4.25 présente les temps de parcours moyens pour les 4 stratégies avec et sans bracelets. Comme pour la distance totale, l'utilisation des bracelets a un effet significatif sur le temps global de réalisation d'une tâche de navigation (Anova $F(1, 56)=85.871$, $p=0,00000$).

Distance totale hors itinéraire. De façon évidente, la distance hors itinéraire est significativement inférieure dans la condition MIXTE (avec les bracelets) par rapport à la condition AUDIO ($F(1, 62)=8.4301$, $p=0,00511$) (voir aussi figure 4.26). Cette observation confirme le rôle des bracelets pour maintenir les utilisateurs sur l'itinéraire. Malheureusement, comme nous l'avons vu, ceci se fait au détriment du temps de parcours moyen, tout au moins dans un espace dégagé comme celui que nous avons simulé.

4.5.3 Conclusion sur l'évaluation des stratégies

Nous présentons maintenant une synthèse et une discussion des différents résultats obtenus et des observations que nous avons effectuées. L'utilisation d'un mécanisme de suivi

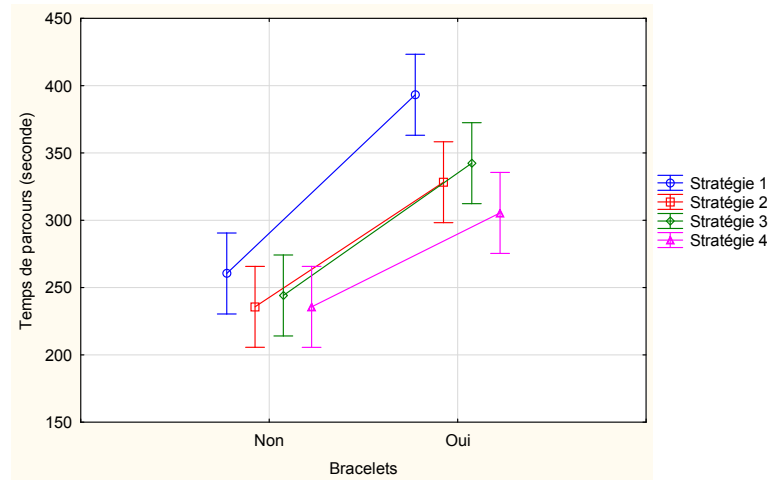


FIGURE 4.25 – Temps de parcours par stratégie de suivi selon l'utilisation ou non du retour haptique avec les bracelets.

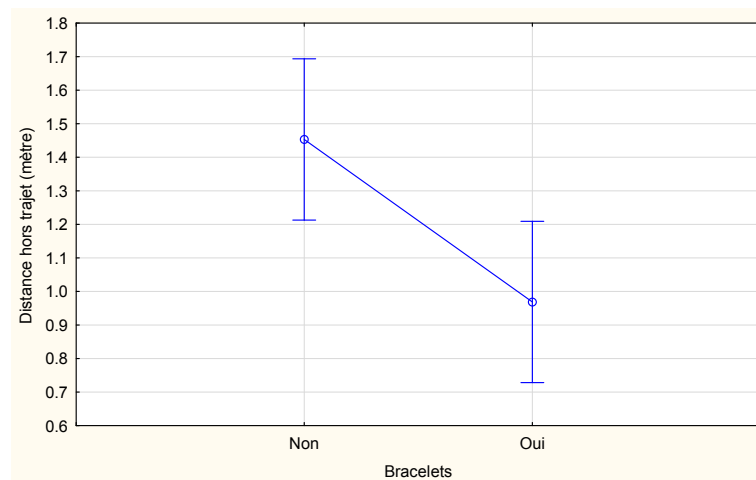


FIGURE 4.26 – Moyennes de distance hors itinéraire avec et sans bracelets vibrants.

d'itinéraire reste nécessaire pour connaître à tout moment l'avancement de l'utilisateur sur l'itinéraire calculé. La méthode de suivi la plus classique consiste à effectuer un suivi point par point dans lequel on s'assure que l'utilisateur a bien atteint le point d'itinéraire courant avant de lui indiquer le point suivant. En ce qui concerne les techniques de validation de ces points de passage, la stratégie du cercle virtuel présente un temps de parcours ainsi qu'une distance totale parcourue généralement supérieure aux autres stratégies (S2, S3 et S4). Les trois stratégies conçues spécifiquement pour les piétons déficients visuels (S2, S3 et S4) sont équivalentes statistiquement en termes de distance totale parcourue ainsi que de temps de parcours.

Cette constatation confirme nos observations réalisées en navigation réelle, et donc notre hypothèse. Avec la stratégie classique du cercle virtuel, l'utilisateur passe trop de temps à tourner autour du point d'itinéraire lorsqu'il doit valider un point de réorientation. Les trois stratégies conçues ont permis de corriger ce défaut.

Avec l'utilisation d'un guidage additionnel sur les lignes droites (présence des bracelets dans la condition MIXTE), nous observons une augmentation significative du temps d'exécution de la tâche ainsi que de la distance totale parcourue. Ces augmentations s'expliquent par le comportement de l'utilisateur qui « oscille » autour de l'itinéraire suite aux

indications données par les vibrations des bracelets. L'augmentation du temps de réalisation de la tâche est expliquée en partie par des arrêts en plus réalisés sur l'itinéraire pour interpréter les instructions reçues par les bracelets (Anova F (1, 56)=25.928, p=0,00000). (voir figure 4.27) Cependant, comme nous l'avons envisagé, l'utilisation des bracelets vibrants permet de diminuer significativement la distance parcourue hors itinéraire et permet donc un déplacement plus sûr, sans s'éloigner d'un couloir virtuel. L'utilisation d'un tel guidage n'est pas nécessaire si l'utilisateur est capable de maintenir un cap, en utilisant par exemple sa canne pour suivre les arêtes d'un mur ou le bord d'un trottoir. Cependant, ce type de guidage pourrait être très utile dans des environnements ouverts comme les places. Pour mémoire, les places restent des environnements à éviter pour les déficients visuels en raison du manque d'information leur permettant de s'orienter.

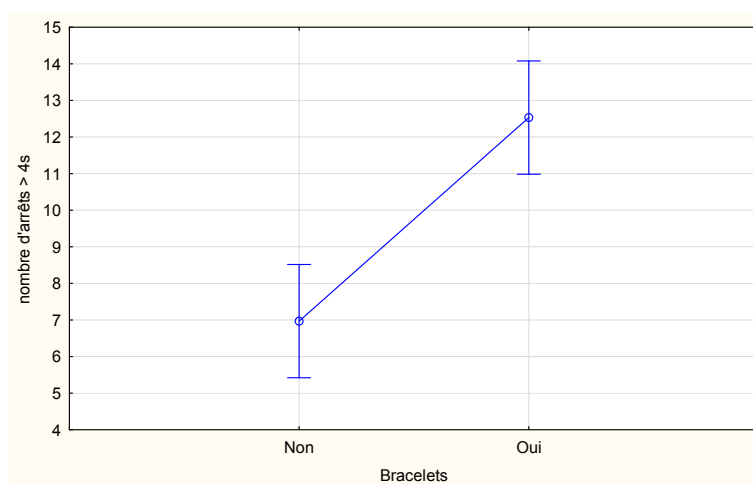


FIGURE 4.27 – Moyenne de nombre des arrêts supérieurs à 4 secondes avec et sans bracelets

Les résultats observés suite à l'évaluation des stratégies de suivi dans le simulateur SIMU4NAV restent à confirmer dans une tâche de navigation réelle. Néanmoins nous pensons que les résultats seront reproductibles en conditions réelles en nous basant sur de nombreux travaux qui démontrent de très bonnes corrélations entre les comportements et les performances en situation virtuelle et réelle. Des évaluations avec le prototype de NAVIG sont prévues pour valider nos résultats en situation réelle.

Cette évaluation s'est basée sur un guidage sonore utilisant exclusivement des sons spatialisés. Il serait intéressant d'étudier les performances des différentes stratégies de suivi lors d'un guidage basé sur des instructions séquentielles du type "tournez à droite dans 30 mètres".

4.6 Discussion générale sur le simulateur

SIMU4NAV a été conçu avec et pour les non voyants. Plusieurs réunions de conception participative nous ont permis de concevoir une plateforme suffisamment souple et adaptée à l'étude du comportement de navigation chez les déficients visuels, ainsi qu'à l'étude des systèmes d'assistance à la navigation.

L'utilisation d'une plateforme de simulation pour l'aide à la navigation pour déficients visuels est une approche qui présente de nombreux avantages pour l'apprentissage et l'aide à la navigation. Cette approche permet aux utilisateurs d'explorer des environnements inconnus en toute sécurité. Elle permet la création de représentations spatiales fiables et utiles lors des déplacements réels dans les mêmes environnements

[Lahav & Mioduser 2008]. Cette approche a été largement étudiée dans la littérature avec des environnements multimodaux sonores et/ou haptiques.

SIMU4NAV, une plate-forme développée dans le même esprit permet de tester facilement différents algorithmes de guidage ou différentes techniques d'interaction avant de les implémenter concrètement dans un système d'aide à la navigation. L'environnement virtuel construit ici correspond à des plans réels puisque les informations utilisées pour construire cet EV sont extraites d'une base de données géographique. D'autres travaux comme [Sánchez *et al.* 2009a] utilisent un environnement virtuel de jeux non réaliste pour l'apprentissage. Nous discutons dans la suite les différents choix de conception ainsi que les résultats obtenus.

4.6.1 L'interaction dans SIMU4NAV

L'interaction dans SIMU4NAV est assurée par les sons spatialisés d'une part et les retours tactiles grâce aux bracelets vibrants d'autre part. Dans des conditions de navigation réelles, l'utilisation de sons spatialisés nécessite d'asservir la position des sons émis par rapport à la tête de l'utilisateur. Cependant, Katz et Picinali [Katz & Picinali 2011] ont montré que dans le cas d'une navigation dans un environnement virtuel, l'utilisateur d'un capteur de tête n'est pas forcément nécessaire. Le son peut être simplement spatialisé en fonction de l'azimut de la cible par rapport à l'orientation du sujet dans l'environnement virtuel. Nous utilisons aussi un moteur de TTS et un moteur de spatialisation pour les différents messages fournis à l'utilisateur.

Dans SIMU4NAV, l'utilisation de la modalité kinesthésique est assurée par les bracelets vibrants. Dans un premier travail exploratoire, nous avons essayé de mettre en place les bases de l'utilisation de cette interface. L'étude exploratrice en situation de navigation réelle nous a permis de définir une première stratégie d'interaction. Cependant des questions comme la charge cognitive nécessaire pour l'interprétation des informations reçues, ou l'utilisation d'autres patrons vibratoires plus adaptés restent à explorer. L'utilisation de la métaphore du « mur », bien qu'elle ait été choisie pour faire les tests en environnement virtuel parce qu'elle était préférée par nos sujets pilotes, pourrait faire l'objet d'une étude comparative avec la métaphore de « l'aimant » dans une tâche de navigation virtuelle.

4.6.2 Modélisation des comportements

Lors de la réalisation d'évaluations dans des environnements simulés, la modélisation des comportements réels est un facteur important à prendre en compte lors de la réalisation de la tâche demandée. Plusieurs travaux ont montré que le transfert des connaissances spatiales entre le monde virtuel et le monde réel avec des environnements minimalistes comme des labyrinthes ou des salles [Waller & Knapp 1998] et [Lahav & Mioduser 2008].

Plusieurs facteurs entrent en jeu dans la modélisation de la tâche de marche, qui est rendue particulièrement complexe pour les non-voyants où les capacités de navigation dépendent fortement de la formation en locomotion reçue ainsi que des critères physiologiques. Pour la dérive angulaire latérale, une valeur moyenne de 10% (1 m pour 10 m) a été retenue. Dans les évaluations réalisées, nous nous sommes basés sur un modèle simple. Cependant, définir différents profils d'utilisateurs sera plus adapté aux déficients visuels au vu des différences inter-sujets que nous avons constatées durant ce travail.

L'erreur de géo-positionnement est aussi un facteur crucial à modéliser dans cette évaluation. Les stratégies de suivi étant principalement dédiées au système NAVIG, l'erreur injectée correspond à une erreur moyenne de 5 mètres 95% du temps. Ces choix ont été faits au regard des résultats escomptés en sortie du moteur de fusion de NAVIG.

Outre le guidage, SIMU4NAV assure les feedbacks nécessaires lors d'un déplacement comme les bruits de pas ou la gestion des collisions avec les bâtiments ou les obstacles, au moyen d'une synthèse vocale et de la librairie OpenAL. Les feedbacks dépendent de la nature du sol et la vitesse de marche. Cependant, aucun objet mobile autre que l'utilisateur n'existe encore dans cette version de l'environnement virtuel. L'implémentation d'un ensemble d'objets mobiles (voitures, piétons, vélos, etc.) est parmi nos priorité pour la prochaine version.

4.6.3 Environnement virtuel et sources de données

SIMU4NAV présente un rendu graphique simpliste, ce choix s'explique par les besoins limités car les utilisateurs principaux sont des non-voyants. Le rendu est utilisé par l'expérimentateur pour suivre le déroulement de l'évaluation. La création de nouveaux environnements est une tâche très simple grâce à la procédure d'extraction et mise en forme de données à partir d'Open Street Map. L'environnement créé peut être modifié à loisir grâce à des outils disponibles dans la communauté OSM. SIMU4NAV, reste une plateforme complètement ouverte se basant uniquement sur des outils libres et gratuits. Il sera donc facile de rajouter des objets dans l'environnement à partir de bases d'objets libres pour peupler l'environnement. Il sera possible aussi de rendre l'EV plus réaliste visuellement et utilisable dans d'autre projets avec d'autres types d'utilisateurs comme les personnes présentant des symptômes de désorientation spatiale suite à des maladies neurodégénératives ou des lésions cérébrales.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté SIMU4NAV, une plate-forme de simulation conçue et implémentée dans le but de tester les différents algorithmes et stratégie de guidage avant leur implémentation dans un système d'aide à la navigation réel (NAVIG). L'évaluation des stratégies de suivi montre bien la faiblesse de la stratégie du cercle virtuel. Cette stratégie longtemps utilisé par les systèmes d'aide à la navigation pour déficients visuels n'est pas en effet optimale. Le temps d'un parcours, ainsi que la distance totale augmente quand le suivi est réalisé par la stratégie du cercle virtuel. Cette observation s'explique par le temps et la distance perdue par les utilisateurs à chercher à valider un point. L'erreur de positionnement introduite correspond à 5m 95% du temps. Il sera intéressant de voir le comportement des différentes stratégies avec des erreurs plus grandes.

L'utilisation d'un guidage sur les sections au moyen des bracelets vibrant n'a pas d'effet sur les performances globales (temps de parcours, distance parcourue). Cependant, la distance hors trajet diminue significativement en utilisant le guidage sur les sections. L'utilisation d'un guidage sur les sections semble une alternative intéressante pour rester sur l'itinéraire (augmenter la sécurité).

Conclusion générale et perspectives

Depuis une quinzaine d'années que le système GPS est accessible au grand public, de nombreux projets ont été initiés afin de proposer une solution de guidage pour les déficients visuels. Certains de ces projets sont restés au stade de la recherche expérimentale, mais ont permis d'apporter des connaissances fondamentales ainsi que des solutions d'assistance pour les problèmes de déplacements des non-voyants. Le projet PGS [Loomis *et al.* 1994] mené à l'université de Californie reste le projet le plus important en termes de résultats obtenus (mené sur une période de 20 ans). Il présente des résultats intéressants aussi bien sur le plan de la recherche fondamentale que sur le plan technique et méthodologique. En parallèle aux projets de recherches, la dernière décennie a vu apparaître les premiers dispositifs commerciaux d'aide au déplacement. Il s'agit, principalement de systèmes GPS pour véhicules modifiés pour être accessibles aux non-voyants. La diffusion de ces systèmes dans la communauté des non-voyants reste limitée. Cela est principalement dû au manque de précision, à l'utilisation d'une cartographie inadaptée et à l'utilisation d'un guidage de type voiture (« tourne à gauche ici »), sans prise en compte du contexte cognitif de la tâche de navigation humaine. Dans le chapitre 2 nous avons donc présenté une revue des principaux projets de recherche et dispositifs commerciaux existants. Nous avons analysé le fonctionnement de ces systèmes et mis en évidence les trois principaux problèmes rencontrés par les utilisateurs. Ces problèmes touchent principalement au positionnement, au système d'informations géographiques (SIG) ainsi qu'aux algorithmes de suivi et de guidage. Ces derniers restent peu précis et non adaptés à une navigation piétonne. Cette thèse s'attache à fournir des contributions pour améliorer les systèmes d'aide à la navigation pour les non-voyants sur ces trois aspects : le positionnement, les SIG et le guidage.

Le positionnement

L'utilisation du système GPS en ville a montré ses limites. Cependant, plusieurs travaux ont proposé des solutions pour améliorer les signaux GPS en rajoutant des capteurs inertiels (accéléromètres, gyroscopes, podomètres, etc) [Caron *et al.* 2006] afin d'estimer les trajectoires réalisées par un piéton (accélération, changement d'orientation brusques, etc). Cette approche reste intéressante mais elle dépend d'une première position connue ainsi que d'une dégradation dans le temps. L'utilisation de la vision par ordinateur pour l'aide à la navigation commence à être utilisable profitant de la puissance de calcul embarquée et des différents algorithmes de vision par machine proposés ces dernières années [Jones & Viola 2001], [Thorpe *et al.* 2001]. Parce que de nombreuses cibles visuelles sont disponibles en ville, nous avons proposé proposons une approche originale permettant l'amélioration du positionnement par fusion multi-capteurs. Nous proposons une architecture basée sur la fusion multi capteurs. La position issue du GPS augmenté (avec centrale inertielle) est fusionnée avec une position déterminée par un module de vision artificielle. Nous adaptons une approche par reconnaissance d'objets géolocalisés. Les algorithmes de vision par machine actuels permettent de détecter des cibles précises dans l'environnement. En enregistrant préalablement la position géographique de cibles visuelles dans l'environnement et en incluant cette information à la base de données cartographique, il devient possible de déterminer précisément la position de l'utilisateur dès que des cibles

visuelles sont reconnues. Ce processus a été évalué en situation réelle et a montré son efficacité. D'autres approches pour la localisation par vision artificielle existent (voir section 2.3.3). [Treuillet & Royer 2010] présentent un système indoor/outdoor basé sur une caméra placée sur le torse de l'utilisateur. La localisation se fait par un mécanisme de comparaison entre le flux vidéo capturé et une cartographie visuelle réalisée en amont. Cette approche, utilisant la vision monoscopique reste intéressante par sa capacité à fonctionner en intérieur. Cependant un traitement d'image doit être réalisé en amont pour extraire de la scène les éléments saillants et créer une cartographie visuelle. L'approche que nous présentons reste limitée par les capacités du moteur de reconnaissance d'objets utilisé. Dans ce travail nous avons utilisé Spikenet. Cet algorithme présente l'avantage d'être extrêmement rapide ; il n'est toutefois que peu tolérant aux changements d'éclairage et d'orientation comparé à d'autres algorithmes de reconnaissance comme SURF ou SIFT. Une étude présentée par [Elloumi *et al.* 2010] montrent que ces deux algorithmes restent très limités lors de mouvements brusques de la caméra ce qui les rend peu appropriés à un système d'aide à la navigation où l'utilisateur réalise beaucoup de mouvements brusques. Cependant Spikenet reste suffisamment robuste face à la luminosité globale et le contraste présente une vitesse de reconnaissance extrêmement rapide avoisinant les 100 ms. La faible robustesse aux changements d'orientation et d'illumination est compensée par le fait qu'il est très rapide. De ce fait nous compensons les problèmes d'orientation et illumination en créant un nombre élevé de modèles dans toutes les situations. Cette approche reste cependant limitée par le processus de création de modèle qui est assez fastidieux. Chaque modèle est sélectionné manuellement dans un flux vidéo. Ce flux doit être enregistré avec les mêmes capteurs que ceux utilisés au moment de la reconnaissance. Ce mécanisme rend l'utilisation des bases d'images libres impossible et constitue un frein à la génération d'une base de modèles universelle. L'utilisation de Spikenet dans le projet NAVIG a permis de mettre en évidence les différentes limitations de ce moteur. Ces problèmes sont traités en partie dans la thèse de A. Brilhault en collaboration avec Spiknet Technology. Les fausses détections représentent un défi supplémentaire à relever pour le bon fonctionnement de l'approche par localisation. Lorsqu'une fausse détection se produit, le système calcule une position issue de la vision sur la base des coordonnées géographiques d'un objet qui n'est pas présent à l'endroit où il a été détecté. Ceci génère donc une position fusionnée incorrecte. Ce mécanisme a été constaté à plusieurs reprises lors des évaluations réalisées. Comme première solution, nous avons réalisé un traitement off-line pour supprimer les fausses détections constatées. Une solution à ce problème consiste dans le chargement / déchargement automatique des modèles. En se basant sur la distance à partir de laquelle les modèles peuvent être détectés, ainsi que la position estimée de l'utilisateur, nous chargeons dans Spikenet uniquement les modèles susceptibles d'être présents dans le champ de la caméra. Ce mécanisme a été testé efficacement. Actuellement, plusieurs travaux sont en cours pour améliorer la robustesse de ce moteur de fusion.

Le SIG

Nous avons présenté un modèle conceptuel complet de Système d'Informations Géographiques adapté pour être utilisé dans des systèmes d'aide à la navigation pour non-voyants. Comme présenté précédemment, pour la navigation d'un piéton, a fortiori déficient visuel, la complétude et la précision de la base de données géographiques sont très importantes et peuvent même être considérées comme un facteur primordial de réussite de la tâche.

L'utilisation des données géographiques permet aussi d'améliorer le positionnement. En effet la technique du map-matching reste intéressante, cependant, il faut avoir un

modèle de la navigation piétonne fiable pour représenter le comportement d'un piéton qui peut changer d'orientation ou faire demi-tour bien plus brusquement qu'une voiture ne peut le faire. L'utilisation d'éléments géographiques comme les bâtiments permet dans un premier temps de faire des ajustements par rapport à des positions proposées impossibles. L'utilisation d'amères visuels géolocalisés se présente comme une approche intéressante pour améliorer le positionnement. cependant, elles doivent être étiquetées dans la base comme des cibles potentielles pour le système de vision artificielle.

La collecte d'informations géographiques reste une tâche lourde et difficile. En plus de la collecte traditionnelle réalisée par les éditeurs ou les collectivités, il existe aujourd'hui des modes de collecte basés sur des processus d'agrégation ou de partage. [Petrie *et al.* 1996], [Elias 2007] proposent de combiner plusieurs sources afin d'avoir le maximum de données. Dans son travail, Elias propose une technique d'auto-extraction de données géographiques à partir de plusieurs bases conçues pour d'autres objectifs (topographique, aménagement urbain) et d'extraire uniquement les données nécessaires à un déplacement piéton. La difficulté réside dans la mise à jour des données qui doit être régulière. Parmi les approches proposées dans la littérature on trouve aussi l'annotation sociale [Völkel & Kühn 2008]. Dans cette approche, les auteurs proposent que le SIG ait une architecture clients/serveur. Chaque utilisateur a la possibilité d'insérer des données (points, lignes ou polygone) et de leur attribuer un nom et une description. De retour chez lui, un utilisateur peut partager et récupérer des données sur un serveur accessible à tous les utilisateurs.

Quelques SIG proposent le mécanisme du « crowdsourcing ». La tâche demandée est réalisée d'une manière collaborative par plusieurs intervenants à la fois. Dans le contexte des données géographiques, Il s'agit d'une collecte collective des données qui peut se faire au sein même du système d'aide à la navigation. Ce principe peut faire émerger une communauté d'usages ayant les mêmes problématiques et objectifs (la navigation des non voyants), pour la collecte de données et le partage social.

Dans cette approche, les contributeurs peuvent ne pas renseigner les bonnes informations ou bien les informations saisies peuvent ne pas être suffisamment précises. Nous pouvons imaginer plusieurs mécanismes de vérification comme la saisie multiple de la même information avant validation ou des méta-utilisateurs qui vérifient les données saisies avant de les partager avec tous.

La classification que nous avons proposée est issue d'un travail de réflexion mené en collaboration avec des experts en psychologie, des formateurs en locomotion ainsi que des non voyants volontaires. Les spécifications proposées pour la conception d'un SIG adapté, contenant toutes les informations nécessaires et suffisantes pour que des non voyants utilisant un système d'assistance à la navigation arrivent à se déplacer en sécurité. L'utilisation de ce SIG par d'autres systèmes reste simple car le serveur est implémenté sur une plateforme mobile SQLite. La proposition d'un SIG adapté est une approche intéressante pour la navigation des non-voyants, mais représente aussi un intérêt majeur pour d'autre type de handicaps, comme par exemple le handicap moteur. En effet il permettrait de calculer un itinéraire adapté pour les fauteuils roulants par exemple. D'une façon générale, le travail sur les SIG peut ouvrir plusieurs perspectives pour le grand public pour le tourisme, la mobilité urbaine, les visites guidées.

Le suivi d'itinéraire

La qualité du guidage est fortement corrélée à la précision offerte par le suivi. L'utilisation d'environnements simulés pour l'évaluation de comportements réels est une approche assez connue dans la littérature. Plusieurs travaux se sont intéressés au rôle des environne-

ments virtuels dans le but de favoriser la création d'une carte mentale de l'environnement [Lahav & Mioduser 2008].

L'avantage de SIMU4NAV est que l'environnement virtuel créé est une représentation fidèle de la réalité extraite d'une base de données géographiques libre (Open Street Map par exemple). Cela nous permet de l'utiliser lors de tâches d'apprentissage par exemple. Il sera assez simple de télécharger une portion de la carte OSM, et de construire un environnement virtuel correspondant à la réalité du terrain.

SIMU4NAV est une plateforme multimodale, elle intègre à la fois la modalité sonore moyennant les sons spatialisés et la modalité tactile avec le concept des bracelets vibrants. L'utilisation d'un joystick à retour de force reste toujours possible pour plus d'interaction. Cette plateforme, de par les choix de conception réalisés, reste entièrement ouverte supportant tout type d'amélioration. Le rendu visuel cependant peut être amélioré en vue d'une utilisation chez des patients désorientés, par exemple, pour des séances de rééducation ou de réadaptation.

Les bracelets vibrants représentent une nouvelle interface. L'utilisation de cette interface lors d'une tâche de guidage a montré son efficacité en permettant aux utilisateurs de rester le plus possible sur l'itinéraire. Aucun effet négatif sur la distance totale ni sur le temps d'exécution de la tâche n'a été constaté (voir section 4.5.2.2). Cette interface présente des avantages en situation de navigation virtuelle qui seront intéressants à évaluer dans des conditions réelles. Cette approche reste intéressante comparée à l'utilisation du dispositif Phantom par exemple, qui reste un outil extrêmement précis mais relativement cher et non adapté à une utilisation nomade.

Perspectives

Le travail décrit dans ce manuscrit ouvre plusieurs perspectives de recherches. Pour le positionnement, il sera intéressant dans un premier temps d'optimiser la fusion implémentée, et de réaliser des évaluations en situation réelle. Il sera aussi intéressant de comparer les performances de l'approche par reconnaissance d'objets à d'autres approches proposées dans la littérature comme la localisation par reconstruction 3D de l'environnement. Le prototype actuel est lourd et encombrant. La bumblebee à elle seule pèse 800g. Ce poids reste assez élevé pour un système qui se veut discret et portable. Actuellement nous sommes en discussions avec CRS (Cambridge Research System) en vue de la conception d'un nouveau prototype basé sur des lunettes embarquant deux caméras miniatures. Les premières spécifications ont été réalisées et discutées.

Concernant le système d'informations géographiques, nous envisageons à court terme de procéder à l'optimisation des principales primitives proposées, notamment le calcul d'itinéraire. Cette optimisation s'impose afin de réduire les temps de calcul. Actuellement une requête de calcul d'itinéraire nécessite entre 5 et 8 secondes ce temps peut être réduit par une organisation plus adéquate de différentes données utilisées lors du calcul.

Les pondérations proposées pour calculer un itinéraire sont issues d'une réflexion conjointe menée avec les formateurs en locomotion et les non voyants. Il sera intéressant de réfléchir à une évaluation expérimentale de ces différentes pondérations. L'utilisation du SIG comme espace de stockage des modèles est aussi une piste intéressante. Pour le moment, le SIG stocke l'adresse d'un fichier qui contient les modèles nous envisageons de stocker les modèles directement dans le SIG. Cette opération va faire gagner du temps de calcul et va alléger les accès aux différentes ressources.

L'évaluation des stratégies de suivi en situation réelle, est aussi parmi nos priorités. Au moment de l'écriture de ce manuscrit nous avons réalisé de nouveaux tests avec la dernière

version du moteur de fusion. Les résultats sont encourageants et laissent à penser qu'il sera prochainement possible d'évaluer en extérieur les stratégies de suivi. Nous pensons donc à intégrer l'interface haptique (les bracelets) dans NAVIG. il faudrait cependant réfléchir à l'articulation de cette interface avec l'interface sonore déjà existante.

Pour la modélisation des comportements, il sera intéressant de créer différents profils. L'avatar représentant l'utilisateur en mouvement hérite donc des différentes propriétés définies dans le profil chargé lors d'une session d'évaluation. Ce mécanisme permettra de limiter les erreurs liées à la spécificité de chaque utilisateur et permettra au moyen d'un questionnaire initial de sélectionner le profil le mieux adapté à l'utilisateur en question. Concernant SIMU4NAV, la conception et l'implémentation de ce simulateur a été un point de départ pour l'utilisation des environnements virtuels pour l'aide à la navigation dans notre équipe. Actuellement deux thèses sont en cours concernant l'importance de ces outils dans l'aide à l'apprentissage et à l'exploration dans un EV pour les déficients visuels. Nous envisageons à court terme d'améliorer les interactions proposées dans SIMU4NAV.

Ce travail de thèse ouvre des perspectives à long terme sur trois domaines scientifiques connexes. En informatique, l'exploitation des nouvelles plateformes collaboratives et sociales pour la collecte et le partage de données géographiques nous semble un défi intéressant à surmonter. Pour le domaine des sciences cognitives, le projet NAVIG, et aux moyens des différentes contributions présentées dans ce manuscrit présente quelques éléments de réponses afin de mieux comprendre la façon dont un déficient visuel aborde une tâche de navigation. L'importance de la préparation d'un itinéraire et les différentes informations à fournir lors de cette phase. Pour le domaine de l'interaction homme-machine, ce travail ouvre des perspectives sur les formes d'interactions non visuelles exploitables lors d'une tâche de navigation ainsi que la charge cognitive nécessaire pour décoder les informations présentées.

Les différentes contributions décrites dans ce manuscrit présentent un intérêt pour la communauté. Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'institut des jeunes aveugles de Toulouse et a fait intervenir activement un groupe de non voyants. Les différents modules proposés ont été conçus en collaboration avec les formateurs en locomotion. Il serait intéressant maintenant d'adapter totalement ou partiellement ces solutions dans des systèmes plus compact et moins contraignant.

Les publications liées à la thèse

Revue internationale

Brian.F.G Katz, **Slim Kammoun**, Gaetan Parseihian, Olivier Gutierrez, Adrien Brillhault, Malika Auvray, Philippe Truillet, Michel Denis, Simon Thorpe, Christophe Jouffrais. Augmented reality guidance system for the visually impaired : Combining object localization, GNSS, and spatial audio. In *Virtual Reality Journal* Vol. 16 N.4, pp. 253-269, Springer, 2012.

Slim Kammoun, Gaetan Parseihian, Olivier Gutierrez, Adrien Brillhault, Antonio Serpa, Mathieu Raynal, Bernard Oriola, Marc Macé, Malika Auvray, Michel Denis, Simon Thorpe, Philippe Truillet, Brian.F.G Katz, Christophe Jouffrais. Navigation and Space Perception Assistance for the Visually Impaired : The NAVIG project. In *BioMedical Engineering and Research*, Vol. 33 N. 2, pp. 182-189, Elsevier, 2012.

Brian, F.G Katz, Florian Dramas, Gaetan Parseihian, Olivier Gutierrez, **Slim Kam-**

moun, Adrien Brillhault, Lucie Brunet, Mathieu Gallay, Bernard Oriola, Malika Auvray, Philippe Truillet, Simon Thorpe, Christophe Jouffrais. NAVIG : Guidance system for the visually impaired using virtual augmented reality. In *Technology and Disability*, Vol. 24 N. 2, pp. 163-178, IOS Press, 2012.

Contributions à des ouvrages de synthèse

Slim Kammoun, Marc Macé, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais, Designing a Virtual Environment Framework for Improving Guidance for the Visually Impaired. In *Designing Inclusive Systems*. Langdon, Clarkson, Robinson, Lazar, Heylighen (Eds.), pp. 217-226, Springer, 2012.

Conférences et workshops internationaux

Philippe Roussille, Mathieu Raynal, **Slim Kammoun**, Emmanuel Dubois, Christophe Jouffrais. DUCK : a deDUCTive Keyboard. In *Proceedings of the Mobile Accessibility Workshop at ACM CHI International Conference on Human Factors in Computing Systems*, 27/04-02/05, Paris, France, avril 2013. (à paraître)

Anke Brock, **Slim Kammoun**, Tiago Guerreiro, Hugo Nicolau, Shane Kane, Christophe Jouffrais. SIG : NVI (Non-Visual Interaction). In *Proceedings of the ACM CHI International Conference on Human Factors in Computing Systems 27/04-02/05*, Paris, France, ACM, 2013. (à paraître).

Slim Kammoun, Marc Macé, Christophe Jouffrais. In *Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 10/12-12/12, Toronto, Canada, ACM, pp.189-190, 2012.

Slim Kammoun, Christophe Jouffrais, Tiago Guerreiro, Hugo Nicolau, Joaquim, A. Jorge. Guiding Blind People with Haptic Feedback. In *Proceedings of Frontiers in Accessibility for Pervasive Computing Workshop at Pervasive 2012*, 18/06-22/06, Newcastle, UK, 2012.

Slim Kammoun, Marc Macé, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais. Towards a Geographic Information System Facilitating Navigation of Visually Impaired Users. In *Proceedings of the 13th International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, 11/07-13/07, Linz, Austria, Lecture Notes in Computer Science 7383, Springer, pp.521-528, 2012.

Slim Kammoun, Marc Macé, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais. Toward a Better Guidance in Wearable Electronic Orientation Aids. In *Proceedings of the IFIP TC13 conference on Human-Computer Interaction*, Lisboa, 05/09-09/09, Lecture Notes in Compute Science 6949, Springer, pp.624-627, 2011.

Adrien Brillhault, **Slim Kammoun**, Olivier Gutierrez, Philippe Truillet, Christophe Jouffrais. Fusion of Artificial Vision and GPS to Improve Blind Pedestrian Positioning. In *Proceedings of the Service computing, Context-aware, Location aware and Positioning techniques Workshop at International Conference on New Technologies, Mobility and*

Security , Paris, France, 07/02-10/02, pp.1-5, IEEE, 2011.

Slim Kammoun, Florian Dramas, Bernard Oriola, Christophe Jouffrais. Route Selection Algorithm for Blind Pedestrian. In *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Corea, 27/10-30/10, pp.2223-2228, IEEE, 2010.

Anke Brock, Jean Luc Vinot, Bernard Oriola, **Slim Kammoun**, Philippe Truillet, Christophe Jouffrais. Methodes et outils de conception participative avec des utilisateurs non-voyants. In *Proceedings of the French speaking Human Computer Interaction conference*, Luxembourg, 20/09-23/09 ACM, 2010.

Bibliographie

- [Adams 1997] Christi J Adams. *An Investigation of navigation Process in Human Locomotor Behavior*. PhD thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997. (Cité en pages 15 et 24.)
- [Arno *et al.* 1999] P Arno, C Capelle, M C Wanet-Defalque, M Catalan-Ahumada et C Veeraart. *Auditory coding of visual patterns for the blind*. *Perception*, vol. 28, no. 8, pages 1013–29, Janvier 1999. (Cité en page 11.)
- [Auvray 2004] M Auvray. *Immersion et perception spatiale*. PhD thesis, 2004. (Cité en page 11.)
- [Bach-y Rita & W Kercel 2003] P Bach-y Rita et Stephen W Kercel. *Sensory substitution and the human machine interface*. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 7, pages 541–546, 2003. (Cité en page 10.)
- [Bach-y Rita *et al.* 1969] P Bach-y Rita, C C Collins, F A Saunders, B White et L Scadden. *Vision substitution by tactile image projection*. *Nature*, vol. 50, no. 5184, pages 83–91, Mars 1969. (Cité en pages 9 et 10.)
- [Bach-y Rita *et al.* 1998] P Bach-y Rita, Kurt A Kaczmarek, M E Tyler et J Garcia-Lara. *Form perception with a 49-point electrotactile stimulus array on the tongue : a technical note*. *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 35, no. 4, pages 427–30, Octobre 1998. (Cité en page 10.)
- [Bach-y Rita 1983] P Bach-y Rita. *Tactile vision substitution : past and future*. *The International journal of neuroscience*, vol. 19, no. 1-4, pages 29–36, Mai 1983. (Cité en page 10.)
- [Bahram *et al.* 2012] Sina Bahram, Arpan Chakraborty et Robert St Amant. *CAVIAR : a vibrotactile device for accessible reaching*. *Proceedings of the 2012 ACM ...*, pages 245–248, 2012. (Cité en page 12.)
- [Baranski *et al.* 2009] P. Baranski, P. Strumillo, M. Bujacz et A. Materka. *A Remote Guidance System Aiding the Blind in Urban Travel*. In *Conference & Workshop on Assistive Technologies for People with Vision & Hearing Impairments (CVHI 2009)*, 2009. (Cité en page 30.)
- [Baranski *et al.* 2010] P Baranski, M Polanczyk et P Strumillo. *A remote guidance system for the blind*. In *International Conference on eHealth Networking Applications and Services Healthcom*, pages 386–390. IEEE, 2010. (Cité en page 29.)
- [Biggs & Srinivasan 2002] S. J. Biggs et A. M. Srinivasan. *Haptic Interfaces*. In *Handbook of virtual environment. Design, Implementation, and Application*, chapitre Haptic int, pages 93–115. London, lawrence e édition, 2002. (Cité en page 119.)
- [Blauert 1974] J Blauert. *Spatial hearing : the psychophysics of human sound localization.*, volume Rev. MIT Press, 1974. (Cité en page 55.)
- [Bohonos *et al.* 2007] S Bohonos, A Lee, A Malik, C Thai et R. Manduchi. *Universal real-time navigational assistance (URNA) : an urban bluetooth beacon for the blind*. In *1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments*, pages 83–87. ACM, 2007. (Cité en page 42.)
- [Borovec 2011] Jirí Borovec. *Fusion of heterogeneous data for better positioning of visually impaired pedestrians*. Rapport technique, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2011. (Cité en pages 66 et 77.)

- [Boy 1997] Guy A. Boy. *The group elicitation method for participatory design and usability testing*. interactions, vol. 4, no. 2, pages 27–33, Mars 1997. (Cité en page 60.)
- [Brabyn 1982] J a Brabyn. *New developments in mobility and orientation aids for the blind*. IEEE transactions on bio-medical engineering, vol. 29, no. 4, pages 285–9, Avril 1982. (Cité en page 16.)
- [Brock et al. 2010] Anke Brock, Jean-Luc Vinot, Bernard Oriola, Slim Kammoun, Philippe Truillet et Christophe Jouffrais. *Méthodes et outils de conception participative avec des utilisateurs non-voyants*. In Conference Internationale Francophone sur l'Interaction Homme-Machine on - IHM '10, page 65, New York, New York, USA, Septembre 2010. ACM Press. (Cité en page 61.)
- [Brock et al. 2012] Anke Brock, Philippe Truillet, Bernard Oriola, Delphine Picard et Christophe Jouffrais. *Design and user satisfaction of interactive maps for visually impaired people*. In K. Miesenberger, A. Karshmer, P. Penaz et W Zagler, éditeurs, ICCHP 2012. LNCS, vol. 7383, pages 544–551, Linz, Austria, 2012. Springer. (Cité en page 64.)
- [Brunet 2010] Lucie Brunet. *Étude des besoins et des stratégies des personnes non-voyantes lors de la navigation pour la conception d'un dispositif d'aide performant et accepté*. Rapport technique, Mémoire de D.E.A., Département of Ergonomics, Université Paris-Sud, Orsay, France, 2010. (Cité en page 105.)
- [Bujacz & Baranski 2008] M Bujacz et P Baranski. *Remote guidance for the blind -A proposed teleassistance system and navigation trials*. In International Conference on Human System Interaction, 2008. (Cité en page 29.)
- [Caron et al. 2006] Francois Caron, Emmanuel Duflos, Denis Pomorski et Philippe Vanheeghe. *GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering : introduction of contextual aspects*. Information Fusion, vol. 7, no. 2, pages 221–230, 2006. (Cité en pages 46 et 141.)
- [Centre d'études sur les réseaux 2012] L'urbanisme Centre d'études sur les réseaux les transports. *Les cheminements des personnes aveugles et malvoyantes. Recommandations pour les aménagements de voirie*. Rapport technique, 2012. (Cité en pages xiii et 99.)
- [D'Atri et al. 2007] Edoardo D'Atri, Carlo Maria Medaglia, Alexandru Serbanati, Ugo Biader Ceipidor, Emanuele Panizzi et Alessandro D'Atri. *A system to aid blind people in the mobility : A usability test and its results*. In Second International Conference on Systems, 2007. (Cité en page 42.)
- [Dejeammes et al. 2008] Maryvonne Dejeammes, Gérard Uzan, M'Balo Seck, Catherine Sidot, Benoit Hiron, Patrice Hallet et Frédéric Murard. *Déplacements des déficients visuels en milieu urbain : Analyse des besoins en sécurité, localisation et orientation, et pistes d'évolution*. Rapport technique, Le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Paris, 2008. (Cité en page 51.)
- [Denham et al. 2004] Jim Denham, Jay Leventhal et Heather McComas. *Getting from Point A to Point B : A review of two GPS systems*. AccessWorld, vol. 5, 2004. (Cité en page 35.)
- [Dijkstra 1959] E. W. Dijkstra. *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*. NUMERISCHE MATHEMATIK, 1959. (Cité en page 51.)
- [Downs & Stea 1977] Roger. M. Downs et David Stea. *Maps in Minds : Reflections on Cognitive Mapping*. Harper & Row, 1977. (Cité en pages 1, 14 et 15.)

- [Dramas *et al.* 2010] Florian Dramas, Simon Thorpe et Christophe Jouffrais. *Artificial Vision For The Blind : A Bio-Inspired Algorithm For Objects And Obstacles Detection*. International Journal of Image and Graphics, vol. 10, no. 4, pages 531–544, 2010. (Cité en pages 12 et 71.)
- [Dramas 2010] Florian Dramas. *Localisation d’objets pour les non voyants : augmentation sensorielle et neuroproth se*. PhD thesis, Toulouse university, 2010. (Cité en pages 12, 72 et 73.)
- [Elias 2007] Birgit Elias. *Pedestrian Navigation-Creating a tailored geodatabase for routing*. In 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC ’07, pages 41–47, 2007. (Cité en page 143.)
- [Ellis 1994] Stephen R. Ellis. *What are Virtual Environments ?* IEEE Computer , Graphics and application, pages 17–22, 1994. (Cité en page 112.)
- [Elloumi *et al.* 2010] Wael Elloumi, Sylvie Treuillet, Remy Leconge et A cha Fonte. *Performance Evaluation of Point Matching Methods in Video Sequences with Abrupt Motions*. In Fifth International Conference on Computer Vision Theory and Applications, pages 427–430, Angers, France, 2010. (Cité en page 142.)
- [Ertan *et al.* 1998] S. Ertan, C. Lee, A. Willets, H. Tan et A. Pentland. *A wearable haptic navigation guidance system*. In Second International Symposium on Wearable Computers, pages 164–165. IEEE Comput. Soc, 1998. (Cité en page 43.)
- [Etienne *et al.* 1996] a S Etienne, R Maurer et V S guinot. *Path integration in mammals and its interaction with visual landmarks*. The Journal of experimental biology, vol. 199, no. Pt 1, pages 201–9, Janvier 1996. (Cité en page 39.)
- [Farcy *et al.* 2006] R. Farcy, R. Leroux, A. Jucha, R. Damaschini, C. Grégoire et A. Zogaghi. *Electronic travel aids and electronic orientation aids for blind people : Technical, rehabilitation and everyday life points of view*. In M.A. Hersh, editeur, Conference & Workshop on Assistive Technologies for People with Vision & Hearing Impairments Technology for Inclusion, page 12, 2006. (Cité en pages 19, 20 et 22.)
- [Foulke 1971] E. Foulke. *The perceptual basis for mobility*. Research Bulletin of the American Foundation for the Blind, vol. 23, pages 1–8, 1971. (Cité en pages 16 et 17.)
- [Fuchs *et al.* 2006] Philippe Fuchs, Guillaume Moreau, Alain Berthoz et Jean-Louis Vercher. *Le trait  de la réalité virtuelle - Volume 1. L’homme et l’environnement virtuel*. 2006. (Cité en page 112.)
- [Fukuda *et al.* 2003] Takuya Fukuda, Toshiharu Horiuchi, Haruhide Hokari et Shoji Shimada1. *Relative distance perception by manipulating the ILD of HRTFs*. Acoustical Science and Technology, vol. 24, no. 5 (special issue), pages 325–326, 2003. (Cité en page 55.)
- [Gallay *et al.* 2012] Mathieu Gallay, Michel Denis et Malika Auvray. *Navigation assistance for blind pedestrians : Guidelines for the design of devices and implications for spatial cognition*. In Representing space in cognition : Interrelations of behaviour, language, and formal models, numéro 33, page in press. 2012. (Cité en pages 62 et 63.)
- [Garling & Golledge 2000] Tommy Garling et Reginald G. Golledge. *Cognitive mapping and spatial decision-making*. In Rob Kitchin et Scott Freundschuh., editeurs, Cognitive mapping : past, present, and future. London ; New York : Routledge, 2000. (Cité en page 13.)

- [Gaunet & Briffault 2005] Florence Gaunet et Xavier Briffault. *Exploring the Functional Specifications of a Localized Wayfinding Verbal Aid for Blind Pedestrians : Simple and Structured Urban Areas*. Human-Computer Interaction, vol. 20, no. 3, pages 267–314, Septembre 2005. (Cité en pages 64 et 65.)
- [Gaunet 2006] F Gaunet. *Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas*. Universal Access in the Information Society, vol. 4, no. 4, pages 338–353, Janvier 2006. (Cité en pages 63 et 105.)
- [Ghouaiel *et al.* 2013] Nehla Ghouaiel, Jean-Marc Cieutat et Jean-Pierre Jessel. *Haptic system for eyes free and hands free pedestrian navigation (regular paper)*. In International Conference on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI), Nice, 24/02/2013-01/03/2013, page (electronic medium), <http://www.iaria.org>, mars 2013. International Academy, Research and Industry Association (IARIA). (Cité en page 55.)
- [Gold & Simson 2005] D. Gold et H. Simson. *Identifying the needs of people in Canada who are blind or visually impaired : Preliminary results of a nation-wide study*. International Congress Series, vol. 1282, pages 139–142, Septembre 2005. (Cité en page 7.)
- [Golledge *et al.* 1991] Reginald G. Golledge, Jack M. Loomis, Roberta L. Klatzky, Andreas Flury et Xiao-Li Yang. *Designing a personal guidance system to aid navigation without sight : progress on the GIS component*. International Journal of Geographical Information Science, vol. 5, pages 373–395, 1991. (Cité en pages 24, 47 et 94.)
- [Golledge *et al.* 1998] Reginald G Golledge, Roberta L Klatzky, Jack M Loomis, Jon M Speigle et Jero Tietz. *A geographical information system for a GPS based personal guidance system*. International Journal of Geographical Information Science, vol. 12, no. 7, pages 727–749, Novembre 1998. (Cité en pages xii, 47, 50, 52, 57 et 98.)
- [González-Mora *et al.* 2006] José Luis González-Mora, Antonio Francisco Rodríguez-Hernández, E Burunat, F Martin et M A Castellano. *Seeing the world by hearing : Virtual Acoustic Space (VAS) a new space perception system for blind people*. In 2nd International Conference on Information & Communication Technologies, volume 1, pages 837–842. IEEE, 2006. (Cité en page 12.)
- [Guerreiro *et al.* 2008] Tiago Guerreiro, Paulo Lago , Hugo Nicolau, Pedro Santana et Joaquim Jorge. *Mobile text-entry models for people with disabilities*. In Proceedings of the 15th European conference on Cognitive ergonomics the ergonomics of cool interaction - ECCE '08, page 1, New York, New York, USA, 2008. ACM Press. (Cité en page 53.)
- [Guerreiro *et al.* 2009] Tiago Guerreiro, Hugo Nicolau, Joaquim Jorge et Daniel Gonçalves. *NavTap : a long term study with excluded blind users*. In Proceeding of the eleventh international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '09, page 99, New York, New York, USA, 2009. ACM Press. (Cité en pages xii et 54.)
- [Guerreiro *et al.* 2010] Tiago Guerreiro, Hugo Nicolau, Joaquim Jorge et Daniel Gonçalves. *Towards accessible touch interfaces*. In Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '10, page 19, New York, New York, USA, 2010. ACM Press. (Cité en page 54.)
- [Hall of fame : Richard edwin hoover 2012] Hall of fame : Richard edwin hoover. *A.P.H.for the Blind.*, 2012. (Cité en page 18.)

- [Havik *et al.* 2010] Else M. Havik, Frank J. J. M. Steyvers, Hanneke van der Velde, J. Christiaan Pinkster et Aart C. Kooijman. *Design and Evaluation of a Protocol to Assess Electronic Travel Aids for Persons Who Are Visually Impaired*. Journal of Visual ... , no. February, pages 84–94, 2010. (Cité en page 34.)
- [Helal *et al.* 2001] A. Helal, S.E. Moore et B. Ramachandran. *Drishti : an integrated navigation system for visually impaired and disabled*. In Fifth International Symposium on Wearable Computers, numéro 45, pages 149–156. IEEE, 2001. (Cité en pages 27 et 41.)
- [Henze *et al.* 2006] Niels Henze, Wilko Heuten et Susanne Boll. *Non-intrusive somatosensory navigation support for blind pedestrians*. In Proc. of Eurohaptics, volume 2006, 2006. (Cité en page 55.)
- [Heuten *et al.* 2008] Wilko Heuten, Niels Henze, Susanne Boll et Martin Pielot. *Tactile wayfinder : A non-visual support system for wayfinding*. In Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction : building bridges, pages 172–181, New York, New York, USA, Octobre 2008. ACM Press. (Cité en pages xii, 55, 56 et 124.)
- [Hub *et al.* 2004] Andreas Hub, Joachim Diepstraten et Thomas Ertl. *Design and development of an indoor navigation and object identification system for the blind*. In Proceedings of the ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '04, page 147, New York, New York, USA, 2004. ACM Press. (Cité en page 44.)
- [Hub *et al.* 2006] Andreas Hub, Tim Hartter et Thomas Ertl. *Interactive tracking of movable objects for the blind on the basis of environment models and perception-oriented object recognition methods*. Proceedings of the 8th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - Assets '06, page 111, 2006. (Cité en page 44.)
- [Hunaiti *et al.* 2006] Z Hunaiti, V Garaj et W Balachandran. *A Remote Vision Guidance System for Visually Impaired Pedestrians*. Journal of Navigation, vol. 59, no. 03, pages 497–504, 2006. (Cité en page 29.)
- [Jacobson 1993] W.H Jacobson. *The Art and Science of Teaching Orientation and Mobility to Persons With Visual Impairments*. American Foundation for the Blind, 1993. (Cité en pages 16 et 50.)
- [Johnson & Higgins 2006] Lise a Johnson et Charles M Higgins. *A navigation aid for the blind using tactile-visual sensory substitution*. In Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, volume 1, pages 6289–92, New York City, USA, Janvier 2006. IEEE. (Cité en pages 19 et 20.)
- [Jones & Viola 2001] MJ Jones et Paul Viola. *Robust real-time object detection*. Workshop on Statistical and Computational Theories ... , 2001. (Cité en page 141.)
- [Ju *et al.* 2009] J.S. Ju, Eunjeong Ko et E.Y. Kim. *EYECane : navigating with camera embedded white cane for visually impaired person*. In Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pages 237–238. ACM, 2009. (Cité en pages 19 et 21.)
- [Katz & Picinali 2011] Brian F G Katz et Lorenzo Picinali. *Spatial audio applied to research with the Blind*. In Pawel Strumillo, editeur, Advances in Sound Localization, numéro 1991, pages 225–250. InTech, April 2011, 2011. (Cité en pages 119 et 138.)
- [Klatzky, Roberta L. *et al.* 1999] Klatzky, Roberta L., Andrew C. Beall, Loomis, Jack M., Golledge, Reginald G. et John W. Philbeck. *Human navigation ability : Tests of*

- the encoding-error model of path integration*. spatial cognition and computation, vol. 1, pages 31–65, 1999. (Cité en page 39.)
- [Klatzky *et al.* 2006] Roberta L Klatzky, James R Marston, Nicholas a Giudice, Reginald G Golledge et Jack M Loomis. *Cognitive load of navigating without vision when guided by virtual sound versus spatial language*. Journal of experimental psychology. Applied, vol. 12, no. 4, pages 223–32, Décembre 2006. (Cité en page 53.)
- [Kulyukin *et al.* 2004] V. Kulyukin, C. Gharpure, J. Nicholson et S. Pavithran. *RFID in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired*. In 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, volume 2, pages 1979–1984. Ieee, 2004. (Cité en page 42.)
- [Kurata *et al.* 2011] Takeshi Kurata, Masakatsu Kouroggi, Tomoya Ishikawa, Yoshinari Kameda, Kyota Aoki et Jun Ishikawa. *Indoor-Outdoor Navigation System for Visually-Impaired Pedestrians : Preliminary Evaluation of Position Measurement and Obstacle Display*. In 2011 15th Annual International Symposium on Wearable Computers, numéro 1, pages 123–124. Ieee, Juin 2011. (Cité en page 42.)
- [Lahav & Mioduser 2008] Orly Lahav et David Mioduser. *Construction of cognitive maps of unknown spaces using a multi-sensory virtual environment for people who are blind*. Computers in Human Behavior, vol. 24, no. 3, pages 1139–1155, Mai 2008. (Cité en pages 109, 112, 120, 138 et 144.)
- [Langer & Kiesel 2012] Markus Langer et Stefan Kiesel. *Deeply Coupled GPS/INS integration in pedestrian navigation systems in weak signal conditions*. ... and Indoor Navigation (... , no. November, pages 13–15, 2012. (Cité en page 82.)
- [Lécuyer & Mobuchon 2003] Anatole Lécuyer et Pascal Mobuchon. *HOMERE : a multi-modal system for visually impaired people to explore virtual environments*. Virtual Reality, 2003. ... , vol. 2003, 2003. (Cité en page 112.)
- [Loomis *et al.* 1994] Jack M. Loomis, Reginald G. Golledge, Roberta L. Klatzky, J. M. Speigle et J. Tietz. *Personal guidance system for the visually impaired*. In first annual ACM conference on Assistive technologies - Assets '94, pages 85–91, New York, USA, Octobre 1994. ACM Press. (Cité en pages xi, 24, 41 et 141.)
- [Loomis *et al.* 1998] Jack M. Loomis, Reginald G. Golledge et Roberta L. Klatzky. *Navigation System for the Blind : Auditory Display Modes and Guidance*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 7, no. 2, pages 193–203, Avril 1998. (Cité en pages 25, 29, 94 et 130.)
- [Loomis *et al.* 2001] J M Loomis, R L Klatzky et R G Golledge. *Navigating without vision : basic and applied research*. Optometry and vision science : official publication of the American Academy of Optometry, vol. 78, no. 5, pages 282–9, Mai 2001. (Cité en pages 16 et 63.)
- [Loomis 1985] Jack M. Loomis. *Digital Map and Navigation System for the Visually Impaired*. Rapport technique, Department of Psychology, University of California, Santa Barbara, 1985. (Cité en page 47.)
- [Makino *et al.* 1998] Hideo Makino, Fumihito Morishita, Yoshio Abe, Shirou Yamamiya, Masaru Hasegawa, Ikuo Ishii et Makoto Nakashizuka. *3-D object recognition and description : A method for the visually impaired using an invisible bar code*. Systems and Computers in Japan, vol. 29, no. 8, pages 1–8, 1998. (Cité en page 43.)
- [Marston *et al.* 2006] James R Marston, Jack M Loomis, Roberta L Klatzky, Reginald G Golledge et Ethan L Smith. *Evaluation of spatial displays for navigation without*

- sight*. ACM Transactions on Applied Perception, vol. 3, no. 2, pages 110–124, Avril 2006. (Cité en page 26.)
- [Meijer 1992] P B Meijer. *An experimental system for auditory image representations*. IEEE transactions on bio-medical engineering, vol. 39, no. 2, pages 112–21, Février 1992. (Cité en page 10.)
- [Mereu & Kazman 1996] Stephen W. Mereu et Rick Kazman. *Audio enhanced 3D interfaces for visually impaired users*. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems common ground - CHI '96, numéro 57, pages 72–78, New York, New York, USA, Janvier 1996. ACM Press. (Cité en page 112.)
- [Muller *et al.* 2001] Michael Muller, David R. Millen et Carol Strohecker. *What makes a representative user representative? a participatory poster*. In CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems - CHI '01, page 101, New York, New York, USA, Mars 2001. ACM Press. (Cité en page 60.)
- [Nam 2011] Y Nam. *Map-based Indoor People Localization using an Inertial Measurement Unit*. Journal of Information Science and Engineering, vol. 1248, pages 1233–1248, 2011. (Cité en page 45.)
- [Nicolau *et al.* 2009] Hugo Nicolau, Joaquim Jorge et Tiago Guerreiro. *Blobby : how to guide a blind person*. In Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems, pages 3601–3606. ACM, 2009. (Cité en page 42.)
- [Noordzij *et al.* 2006] Matthijs L Noordzij, Sander Zuidhoek et Albert Postma. *The influence of visual experience on the ability to form spatial mental models based on route and survey descriptions*. Cognition, vol. 100, no. 2, pages 321–42, Juin 2006. (Cité en page 62.)
- [O’Keefe & Nadel 1978] John O’Keefe et Lynn Nadel. *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford University Press, 1978. (Cité en pages xv, 13 et 14.)
- [Oskiper *et al.* 2012] Taragay Oskiper, Supun Samarasekera et Rakesh Kumar. *Multi-sensor navigation algorithm using monocular camera, IMU and GPS for large scale augmented reality*. In 2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pages 71–80. Ieee, Novembre 2012. (Cité en page 82.)
- [Parlouar *et al.* 2009] Rémi Parlouar, Florian Dramas, Marc J-M Macé et Christophe Jouffrais. *Assistive device for the blind based on object recognition : an Application to Identify Currency Bills*. In SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pages 227–228, New York, New York, USA, Octobre 2009. ACM Press. (Cité en page 44.)
- [Parseihian 2012] Gaëtan Parseihian. *Sonification binaurale pour l’aide à la navigation*. PhD thesis, Thèse de doctorat de l’ Université Pierre et Marie Curie, 2012. (Cité en pages 37, 55, 63 et 119.)
- [Peruch *et al.* 1995] Patrick Peruch, Jean-Louis Vercher et Gabriel M. Gauthier. *Acquisition of Spatial Knowledge Through Visual Exploration of Simulated Environments*. Ecological Psychology, vol. 7, no. 1, pages 1–20, Mars 1995. (Cité en page 112.)
- [Petrie *et al.* 1996] H. Petrie, V. Johnson, T. Strothotte, A. Raab, S. Fritz et R. Michel. *MoBIC : Designing a travel aid for blind and elderly people*. Journal of Navigation, vol. 49, no. 01, pages 45–52, 1996. (Cité en pages 27, 48 et 143.)
- [Pielot *et al.* 2010] Martin Pielot, Benjamin Poppinga et Susanne Boll. *PocketNavigator : Vibro-tactile waypoint navigation for everyday mobile devices*. In MobileHCI 2010, pages 423–426, 2010. (Cité en pages xiv et 124.)

- [Ran *et al.* 2004] L. Ran, S. Helal et S. Moore. *Drishti : an integrated indoor/outdoor blind navigation system and service*. In Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications, 2004. Proceedings of the, pages 23–30. IEEE, 2004. (Cité en pages 28 et 43.)
- [Richaume-Crinquette Anita 1990] Richaume-Crinquette Anita. *L'accès à l'information parlée chez l'aveugle*. PhD thesis, Université Lille 3 Charles De Gaulle, Villeneuve d'Ascq., 1990. (Cité en page 61.)
- [Roentgen *et al.* 2008] Uta R Roentgen, Gert Jan Gelderblom, Mathijs Soede et Luc P de Witte. *Inventory of Electronic Mobility Aids for Persons with Visual Impairments : A Literature Review*. J. Visual Impairment & Blindness, vol. 102, no. 11, pages 702–724, 2008. (Cité en page 20.)
- [Ronzel *et al.* 2009] P. Ronzel, G. Dupeyron et P. Dublineau. *Naissance de la Fédération française des établissements de Soins de Suite et de Réadaptation pour déficients visuels (FF SSR-DV)*, 2009. (Cité en page 18.)
- [Ross & Blasch 2000] David A Ross et Bruce B Blasch. *Wearable interfaces for orientation and wayfinding*. In Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies - Assets '00, pages 193–200, New York, New York, USA, Novembre 2000. ACM Press. (Cité en pages 55 et 124.)
- [Rümelin *et al.* 2011] S. Rümelin, Enrico Rukzio et R. Hardy. *NaviRadar : a novel tactile information display for pedestrian navigation*. In Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, pages 293–302. ACM, 2011. (Cité en page 124.)
- [Sánchez & Hassler 2006] Jaime Sánchez et Tiago Hassler. *AudioMUD : A multi-user virtual environment for blind people*. In 2006 International Workshop on Virtual Rehabilitation, volume 15, pages 64–71. IEEE, Mars 2006. (Cité en pages 109 et 112.)
- [Sánchez & Tadres 2010] Jaime Sánchez et Angelo Tadres. *Audio and haptic based virtual environments for orientation and mobility in people who are blind*. In Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '10, pages 237–238, New York, New York, USA, Octobre 2010. ACM Press. (Cité en page 112.)
- [Sánchez *et al.* 2009a] Jaime Sánchez, Angelo Tadres, Alvaro Pascual-Leone et Lotfi B Merabet. *Blind children navigation through gaming and associated brain plasticity*. In Virtual Rehabilitation International Conference, pages 29–36. IEEE, Juin 2009. (Cité en pages 112 et 138.)
- [Sánchez *et al.* 2009b] Jaime Sánchez, Angelo Tadres, Alvaro Pascual-Leone et Lotfi B Merabet. *Blind children navigation through gaming and associated brain plasticity*. In Virtual Rehabilitation International Conference, pages 29–36. IEEE, Juin 2009. (Cité en page 119.)
- [Sánchez *et al.* 2011] Jaime Sánchez, Mascaró Javiera et Javiera Mascaró. *Audiopolis, navigation through a virtual city using audio and haptic interfaces for people who are blind*. In Universal Access in Human-Computer Interaction, volume 6766, pages 362–371. Springer, 2011. (Cité en page 112.)
- [Schloerb *et al.* 2010] David W Schloerb, Orly Lahav, Joseph G Desloge et Mandayam A Srinivasan. *BlindAid : Virtual environment system for self-reliant trip planning and orientation and mobility training*. In 2010 IEEE Haptics Symposium, pages 363–370. IEEE, Mars 2010. (Cité en pages xiii, 109, 112 et 120.)

- [Srikulwong & O'Neill 2010] Mayuree Srikulwong et Eamonn O'Neill. *A comparison of two wearable tactile interfaces with a complementary display in two orientations*. Haptic and Audio Interaction Design - 5th International Workshop, HAID 2010, pages 139–148, 2010. (Cité en page 124.)
- [Strelow ER. 1985] Strelow ER. *What is needed for a theory of mobility : Direct perceptions and cognitive maps lessons from the blind*. Psychological review, vol. 92, no. 2, pages 226–248., 1985. (Cité en page 17.)
- [Strothotte *et al.* 1996] Thomas Strothotte, Stefi Fritz, Rainer Michel, Andreas Raab, Helen Petrie et Valerie Johnson. *Development of dialogue systems for a mobility aid for blind people : initial design and usability testing*. In international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pages 139–144, 1996. (Cité en page 27.)
- [Swobodzinski & Raubal 2009] Martin Swobodzinski et Martin Raubal. *An Indoor Routing Algorithm for the Blind : Development and Comparison to a Routing Algorithm for the Sighted*. International Journal of Geographical Information Science, vol. 23, no. 10, pages 1315–1343, Octobre 2009. (Cité en pages 50 et 94.)
- [Sylvie Treuillet *et al.* 2007] Sylvie Treuillet, Eric Royer, Thierry Chateau, Michel Dhome et Jean-Marc Lavest. *Body Mounted Vision System for Visually Impaired Outdoor and Indoor Wayfinding Assistance*. In M.A. Hersh (ed.), editeur, Conference & Workshop on Assistive Technologies for People with Vision & Hearing Impairments Assistive Technology for All Ages, 2007. (Cité en page 82.)
- [Thorpe *et al.* 2001] Simon J Thorpe, Arnaud Delorme et Rufin Vanrullen. *Spike-based strategies for rapid processing Spike-based strategies for rapid processing*. Neural Networks, vol. 14, no. 33, pages 715–726, 2001. (Cité en page 141.)
- [Timpf *et al.* 1992] Sabine Timpf, Gary S Volta, David W Pollock, Max J Egenhofer et Boardman Hall. *A Conceptual Model of Wayfinding Using Multiple*. In International Conference GIS - From Space to Territory : Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning, volume 639, pages 348–367, Pisa, Italy, 1992. Springer. (Cité en page 15.)
- [Treuillet & Royer 2010] Sylvie Treuillet et Eric Royer. *Outdoor/Indoor Vision-Based Localization for Blind Pedestrian Navigation Assistance*. International Journal of Image and Graphics, vol. 10, no. 4, pages 481–496, 2010. (Cité en pages 82 et 142.)
- [Tzovaras *et al.* 2004] Dimitrios Tzovaras, Georgios Nikolakis, Georgios Fergadis, Stratos Malasiotis et Modestos Stavrakis. *Design and implementation of haptic virtual environments for the training of the visually impaired*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 12, no. 2, pages 266–78, Juin 2004. (Cité en page 112.)
- [Van Erp *et al.* 2005] Jan B F Van Erp, Hendrik A H C Van Veen, Chris Jansen et Trevor Dobbins. *Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt*. ACM Transactions on Applied Perception, vol. 2, no. 2, pages 106–117, Avril 2005. (Cité en pages 55 et 124.)
- [Villanueva 2011] Joselin Villanueva. *Contribution à la télémétrie optique active pour l'aide aux déplacements des non voyants*. PhD thesis, Université Paris Sud 11, 2011. (Cité en page 19.)
- [Vitense *et al.* 2002] HS Vitense, JA Jacko et VK Emery. *Foundation for improved interaction by individuals with visual impairments through multimodal feedback*. Universal Access in the Information . . . , pages 76–87, 2002. (Cité en page 119.)

- [Völkel & Kühn 2008] Thorsten Völkel et Romina Kühn. *Mobility impaired pedestrians are not cars : Requirements for the annotation of geographical data*. In International Conference on Computers Helping People with Special, pages 1085–1092, 2008. (Cité en pages 51, 94 et 143.)
- [Völkel & Weber 2008] Thorsten Völkel et Gerhard Weber. *RouteCheckr : personalized multicriteria routing for mobility impaired pedestrians*. SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pages 185–192, 2008. (Cité en pages 51 et 94.)
- [Walker & Lindsay 2006] BN Walker et Jeffrey Lindsay. *Navigation performance with a virtual auditory display : Effects of beacon sound, capture radius, and practice*. Human Factors : The Journal of the Human . . . , vol. 48, no. 2, pages 265–278, 2006. (Cité en pages 29, 31, 55, 98, 101 et 130.)
- [Waller & Knapp 1998] David Waller et David Knapp. *The Transfer of Spatial Knowledge*. Presence, vol. 7, no. 2, pages 129–143, 1998. (Cité en page 138.)
- [Wan et al. 2012] Xiaoang Wan, Ranxiao Frances Wang et James a Crowell. *The effect of landmarks in human path integration*. Acta psychologica, vol. 140, no. 1, pages 7–12, Mai 2012. (Cité en page 39.)
- [Wieser et al. 2007] Manfred Wieser, Bernhard Hofmann-Wellenhof, Bernhard Mayerhofer et Bettina Pressl. *A navigation concept for visually impaired pedestrians in an urban environment*. Vermessung & Geoinformation, vol. 2, pages 159 – 165, 2007. (Cité en page 98.)
- [William Penrod et al. 2005] William Penrod, Michael D. Corbett et Bruce Blasch. *A Master Trainer Class for Professionals in Teaching the UltraCane Electronic Travel Device*. Journal of Visual Impairment & Blindness, vol. 99, no. 11, pages 711 – 714, 2005. (Cité en page 33.)
- [Wilson et al. 2007] Jeff Wilson, Bruce N. Walker, Jeffrey Lindsay, Craig Cambias et Frank Dellaert. *SWAN : System for Wearable Audio Navigation*. In IEEE International Symposium on Wearable Computers, pages 1–8. Ieee, Octobre 2007. (Cité en pages xi, 28 et 29.)
- [Working Groupe on Mobility Aids for the Visually Impaired 1986] Working Groupe on Mobility Aids for the Visually Impaired. *Electronic Travel Aids : New Directions for Research*. Rapport technique, National Academies Press, 1986. (Cité en pages 16, 17 et 19.)
- [Yuen & MacDonald 2005] DCK Yuen et BA MacDonald. *Vision-based localization algorithm based on landmark matching, triangulation, reconstruction, and comparison*. Robotics, IEEE Transactions on, vol. 21, no. 2, pages 217–226, 2005. (Cité en page 43.)