

UNIVERSITÉ CLERMONT AUVERGNE
ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES
POUR L'INGÉNIEUR DE
CLERMONT-FERRAND

THÈSE

Présentée par
Jérémy KALSRON

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : INFORMATIQUE

**Génération automatique
d'abstractions de carrefours pour les
personnes concernées par la
déficience visuelle**

Thèse dirigée par Fabien FESCHET

soutenue le *date inconnue*

Commit aaa80a746d280796ac7796cadf75b1ab2798bc08

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Inconnu INCONNU	- Inconnu
	Inconnu INCONNU	- inconnue
<i>Examinateurs :</i>	Inconnu INCONNU	- Inconnu
	Inconnu INCONNU	- Inconnu
<i>Président :</i>	Inconnu INCONNU	- Inconnu
<i>Directeurs :</i>	Jean-Marie FAVREAU	- Université Clermont Auvergne
	Fabien FESCHET	- Université Clermont Auvergne
	Guillaume TOUYA	- Université Gustave Eiffel

Remerciements

TODO

Table des matières

Introduction	13
1 État de l'art	15
1.1 Se repérer dans l'espace urbain pour une personne déficiente visuelle	15
1.1.1 Les mécanismes cognitifs mobilisés par les PSDV	15
1.1.2 Les pratiques des instructeurs pour l'autonomie	16
1.2 Les données géographiques et l'accessibilité	17
1.2.1 Que sont les données d'accessibilité ?	17
1.2.2 Les bases de données existantes	18
1.3 Les dispositifs pour rendre accessibles les données géographiques	19
1.3.1 Les descriptions autosuffisantes	19
1.3.2 Les cartes en relief	20
1.3.3 Les cartes sonores et audiotactiles	21
1.3.4 Les dispositifs d'aide in-situ	22
1.3.5 La réalité virtuelle et les maquettes interactives	23
1.4 Synthèse et conclusion	24
2 La modélisation du carrefour	25
2.1 Le carrefour pour une personne déficiente visuelle	25
2.1.1 La structure globale du carrefour	25
2.1.2 Trottoirs et traversées : la structure en graphe du carrefour	25
2.1.3 Les repères au sein du carrefour	25
2.2 La modélisation d'un carrefour au sein d'OpenStreetMap	25
2.2.1 Une forte capacité de représentation	25
2.2.2 Des variations dans les modélisations	25
2.3 Un modèle de carrefour	25
2.3.1 OSM-Objet : une modélisation objet de la donnée OpenStreetMap .	26
2.3.2 Application à la modélisation du carrefour	26
2.3.3 Instancier le modèle depuis OpenStreetMap	26
3 La description du carrefour	27
3.1 La description exocentrale	27
3.1.1 Une description générale	27
3.2 La description égocentrale	27
3.2.1 Une description interactive	27
3.3 La description "à la carte"	27
3.3.1 Pourquoi permettre de personnaliser la description	27
3.3.2 Le texte comme un style cartographique	27
3.4 La description dans la carte	27

3.4.1	Fusion de la carte et du texte	28
4	Implémentation	29
4.1	La description égocentré en fiction hypertexte	29
4.2	Du graphe OpenStreetMap à la description exocentré	29
4.3	Un plugin QGIS pour personnaliser la description	29
5	Évaluation	31
5.1	Évaluation des descriptions	31
5.2	Évaluation du modèle	31
5.3	Évaluation du pipeline de conception de description	31
6	Conclusions et perspectives	33
6.1	Discussion générale	33
6.2	Aller au-delà du carrefour	33
6.3	L'apport de l'intelligence artificielle	33
6.4	Conclusion	33

Table des figures

1.1	Exemples de cartes tactiles concues par des instructeurs.	16
1.2	Représentation en couches de données géographiques.	17
1.3	Exemple issu de [1] sur les bonnes pratiques d'implantation de Bandes d'Éveil de Vigilance (BEV).	18
1.4	La description des carrefours proposée par [2] est intégrée à l'itinéraire. Les branches du carrefour sont indiquées.	20
1.5	Exemples de cartes tactiles imprimées sur du papier thermogonflé.	20
1.6	Sonarvision : un exemple d'application de guidage qui repose sur le Global Navigation Satellite Systems (GNSS) et la caméra d'un smartphone.	
	Source : https://youtu.be/geGq59f11z0	23

Liste des tableaux

1.1	Résumé des points abordés pour chaque entrée de l'état de l'art sur les cartes tactiles.	21
1.2	Résumé des modalités de chaque entrée de l'état de l'art.	24

Glossaire

- AFIADV** Association Francophone des Instructeurs pour l'Autonomie des personnes Déficientes Visuelles. 16
- AILDV** Association des Instructeurs de Locomotion pour personnes Déficientes Visuelles. 16
- AVJADV** Association des Instructeurs pour l'Autonomie dans la Vie Journalière des personnes Aveugles ou Déficientes Visuelles. 16
- BEV** Bandes d'Éveil de Vigilance. 7, 18
- CEREMA** Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement. 17
- CNIG** Conseil National de l'Information Géolocalisée. 17, 18
- GNSS** Global Navigation Satellite Systems. 7, 22, 23
- GPS** Global Positioning System. 23
- GTFS** General Transit Feed Specification. 18
- IA** Instructeur pour l'Autonomie des personnes déficientes visuelles. 16
- IAVJ** Instructeur en Autonomie de la Vie Journalière. 16
- IGV** Information Géographique Volontaire. 18
- IL** Instructeur de Locomotion. 16
- LOM** Loi d'Orientation des Mobilités. 17
- NeTEX** Network Timetable Exchange. 17, 18
- OSM** OpenStreetMap. 18
- PCDV** Personne Concernée par la Déficience Visuelle. 17, 19, 22, 24
- SGBDR** Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles. 17
- SIG** Système d'Information Géographique. 17, 22

Introduction

La déficience visuelle correspond à la perte de tout ou partie de la vue. En France, 1,7 million de personnes sont concernées par la déficience visuelle **TODO** Voir dernière enquête HS du Ministère de la Santé. Selon le degré de cécité, cela impacte l'autonomie des personnes dans leur quotidien et la mobilité en est un enjeu majeur. Elle nécessite alors des compétences particulières pour se repérer dans l'espace et analyser son environnement. Ces dernières peuvent s'acquérir auprès d'un instructeur pour l'autonomie, qui accompagnera la personne pour l'aider à compenser l'absence de vision par l'usage d'autres sens comme l'ouïe ou le toucher. Lors de mises en situation, ou pour documenter un itinéraire, l'instructeur pour l'autonomie pourra également réaliser une carte en relief du lieu étudié. Cette pratique, coûteuse en temps, est généralement artisanale et peut être réalisée à l'aide d'aimants, ou sur papier thermogonflé en décalquant une photographie aérienne. **TODO** Parler de l'enquête Homère.

Le projet ACTIVmap, pour Assistance à la Conception de cartes pour déficients visuels, est un projet ANR commencé en 2020 pour une durée de quatre ans. Il regroupe trois laboratoires aux spécialités complémentaires : le LASTIG en information géographique, l'IRIT en interaction homme-machine et le LIMOS en informatique, ainsi que l'entreprise FeelObject spécialisée dans la conception de cartes tactiles audiodécrivées. L'objectif du projet est de proposer des méthodes et outils d'aide à la génération de cartes tactiles mobilisables par les instructeurs pour l'autonomie. Par ailleurs, le projet s'intéresse à l'adjonction d'audiodescriptions aux cartes pour augmenter leur portée et leur efficacité. Pour assurer la pérennité et la reproductibilité des réalisations, celles-ci se basent sur des données sous licence libre.

L'espace d'expérimentation choisi se concentre sur les carrefours urbains. Ils représentent, à l'instar des espaces ouverts, une difficulté importante dans le déplacement des personnes concernées par la déficience visuelle en ville par leur potentielle complexité. Il est ainsi nécessaire d'étudier attentivement la configuration et l'équipement d'un carrefour pour pouvoir le traverser en sécurité.

Cette thèse s'inscrit dans le projet en s'intéressant spécifiquement à la génération automatique d'audiodescriptions de carrefour depuis des données géographique. L'approche choisie est pluridisciplinaire : elle mobilise des connaissances et outils d'acquisition et de traitement de données issues de la géomatique, et de formalisation issues de l'informatique.

Ce mémoire est composé de six chapitres.

Le premier chapitre consacré à l'état de l'art abordera la manière dont les personnes concernées par la déficience visuelle se repèrent dans l'espace urbain, en s'intéressant aux pratiques et dispositifs existants. Il définira ensuite ce qu'est une donnée d'accessibilité,

en examinant les bases existantes. Puis il abordera ensuite les travaux existants qui s'intéressent à la génération de représentations tactiles et textuelles de données géographiques, en particulier celles qui concernent les carrefours. Enfin, le chapitre introduira les contributions de ce travail.

Le second chapitre s'intéresse à la modélisation d'un carrefour urbain. Dans un premier temps, il détaille la représentation en branches habituellement mobilisée par les personnes concernées par la déficience visuelle et les besoins de descriptions des traversées. Il explore ensuite les capacités d'OpenStreetMap pour représenter un carrefour du point de vue d'un usager vulnérable. En s'appuyant sur les éléments précédents, il présente une abstraction du carrefour sous la forme d'un modèle objet instanciable depuis OpenStreetMap.

Le troisième chapitre s'appuie sur la modélisation du carrefour pour explorer les différents paradigmes de description. Il se concentre ensuite sur les possibilités de personnalisation de celles-ci pour les adapter à de nouveaux usages. Puis, il expose des méthodes de spatialisation du texte pour produire une carte audiodécrite.

Le quatrième chapitre présente les trois implémentations réalisées selon les méthodes décrites dans les chapitres précédents. La première correspond à un prototype de description égocentrale sous la forme d'un document hypertexte. La seconde part du graphe OpenStreetMap pour réaliser la description exocentrale. La troisième implémente le pipeline partant de la donnée géographique au texte au sein d'un plugin QGIS.

Le cinquième chapitre se concentre sur les évaluations des différents travaux. **TODO**

Enfin, le chapitre de conclusion réalise une synthèse des travaux réalisés et évoque les différentes perspectives qu'il laisse entrevoir.

Chapitre 1

État de l'art

1.1 Se repérer dans l'espace urbain pour une personne déficiente visuelle

La déficience visuelle correspond à la perte de tout ou partie de la vue. On quantifie la capacité à discriminer les objets à l'aide de l'indicateur d'acuité visuelle. Ce dernier est notamment utilisé par l'OMS pour définir la déficience visuelle, et au-delà la malvoyance et la cécité. Ainsi, on parle de malvoyance lorsque l'œil le plus performant a un score de 3/10^{ème}, et de cécité lorsqu'il a un score inférieur à 1/20^{ème}. Selon le degré de cécité, il peut subsister un résidu visuel qui correspond à une perception de la lumière ou du contour des objets.

La sévérité de l'atteinte visuelle affecte la capacité des personnes à se déplacer en autonomie [3]. Au-delà de l'atteinte visuelle, les handicaps associés peuvent également contribuer à rendre le déplacement plus difficile. En ce sens, les besoins peuvent varier d'une personne à une autre.

1.1.1 Les mécanismes cognitifs mobilisés par les PSDV

Plusieurs stratégies sont mises en place par les personnes concernées lors de leur déplacement pour compenser l'absence de vision à l'aide des autres sens. La principale concerne la canne blanche, qui joue un rôle double. Elle permet en premier lieu de détecter les obstacles et objets présents sur son chemin. Mais elle joue également un rôle social en signalant aux autres usagers que la personne qui la porte est aveugle ou malvoyante [4]. Par ailleurs, il existe des cannes blanches électroniques, équipées de capteurs pouvant détecter des obstacles à distance (voir 1.3.4). Ces dernières sont cependant moins utilisées que leur variante traditionnelle [3].

Mais la canne blanche n'est pas suffisante pour se repérer dans l'espace. Son champ d'action se limite à une surface réduite face à l'utilisateur. Elle est complétée par l'ouïe qui va permettre à la personne d'appréhender l'espace en écoutant les sons de l'environnement urbain. Détecter un moteur à l'arrêt peut par exemple permettre de repérer un passage piéton en aval d'une voiture. Les dispositifs sonores en ville qui équipent certains feux vont permettre à la fois de repérer une traversée, mais également de la réaliser en sécurité [1.3.1]. L'ouïe joue également un rôle fort dans l'écholocation, c'est-à-dire la capacité à utiliser les échos pour percevoir les objets [5].



FIGURE 1.1 – Exemples de cartes tactiles concues par des instructeurs.

En cognition spatiale, une carte mentale correspond à un modèle conceptuel d'un espace et des objets qui le composent [6]. Pour déplacer en autonomie dans un environnement urbain, avoir conscience de la position relative des espaces connus pour pouvoir s'orienter. Un aspect important de cette carte mentale concerne les repères. Ceux-ci vont permettre, à l'aide des notions d'indices de preuves [7], de confirmer sa position et sa direction. Les repères peuvent faire appel au sens du toucher (un objet que l'on va sentir à la canne), de vue (une fontaine en fonctionnement), ou de l'odorat (en boulangerie ouverte). On peut également définir les repères à l'aide de trois attributs : Permanents, Caractéristiques et Fiables (PCF) [8]. Ainsi, un repère qui respecte ces trois critères sera tout le temps mobilisables, au contraire d'une fontaine ou d'un commerce qui peuvent être intermittents.

1.1.2 Les pratiques des instructeurs pour l'autonomie

L'Association Francophone des Instructeurs pour l'Autonomie des personnes Déficientes Visuelles (AFIADV) est issue de la fusion de l'Association des Instructeurs de Locomotion pour personnes Déficientes Visuelles (AILDV) et de l'Association des Instructeurs pour l'Autonomie dans la Vie Journalière des personnes Aveugles ou Déficientes Visuelles (AVJADV). Ces dernières formaient respectivement les Instructeur de Locomotions (ILs) et les Instructeur en Autonomie de la Vie Journalières (IAVJs). L'AFIADV forme aujourd'hui des Instructeur pour l'Autonomie des personnes déficientes visuelles (IAs) dont la profession regroupe les deux expertises précédentes. Il y a peu de littérature francophone sur les pratiques des IL, dont le métier était uniquement centré sur la locomotion. Les actuels IA correspondent davantage au modèle nord-américains des instructeurs en orientation et mobilité. À ce titre, [4] est une référence actuelle sur les pratiques de la nouvelle génération d'instructeur en France.

Dans ce contexte, le rôle de l'IA est d'accompagner la personne aveugle ou malvoyante dans la compensation de la perte de la vue par l'usage des autres sens. Elle peut, pour cela, mobiliser des cartes en relief. S'il existe des outils de conception automatisée (voir 1.3.2), la pratique de réalisation des cartes en relief est aujourd'hui majoritairement artisanale [1]. Lors d'une séance de locomotion, un IA réalise parfois une carte de situation en utilisant des aimants. Ce dispositif permet notamment une interaction avec l'apprenant qui peut les déplacer selon sa compréhension du lieu. Pour représenter une zone plus complexe et faire une carte plus exploratoire, les IAs réalisent des cartes imprimées sur du papier thermogonflé. Ces cartes sont aujourd'hui réalisées en décalquant une photographie aérienne et complétées par connaissance du terrain, notamment sur les zones couvertes par la végétation.

Pour les carrefours spécifiquement, à l'instar des aménageurs, les instructeurs pour l'autonomie mobilisent à la fois les typologies standards et les branches.

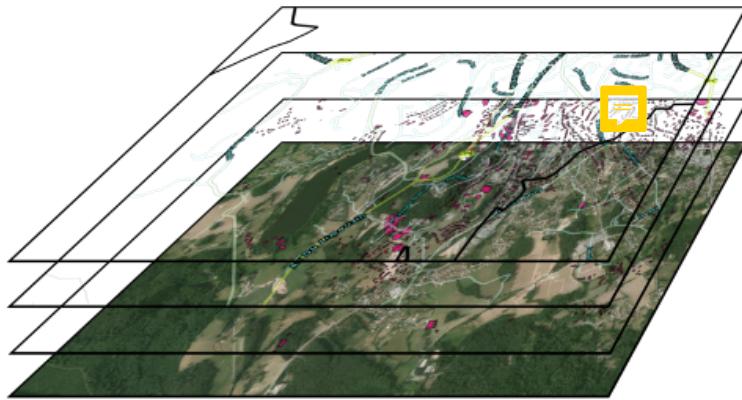


FIGURE 1.2 – Représentation en couches de données géographiques.

1.2 Les données géographiques et l'accessibilité

1.2.1 Que sont les données d'accessibilité ?

Dans un Système d'Information Géographique (SIG), les données sont généralement représentées sous la forme de couches dont l'empilement compose la carte, à la manière des logiciels de dessin assisté par ordinateur (voir 1.2). On distingue principalement les données raster et les données vectorielles. Les premières correspondent à une grille dont chaque cellule contient une valeur, et permettent de stocker par exemple des images ou des reliefs. Les secondes correspondent à des données structurées ou non auxquelles est accolée une abstraction géométrique de la réalité. Il s'agit principalement de données tabulaires avec une ou plusieurs colonnes de géométrie, ces dernières pouvant être des points, des lignes ou des polygones. Une couche est ainsi une table telle qu'on peut la définir dans un Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR) [9]. Le paradigme en couches n'est pas la seule manière de représenter les données géographiques : il est par exemple possible de les représenter sous forme de graphe [10].

Une donnée d'accessibilité est une donnée géographique qui décrit les conditions d'accès d'un lieu au regard des nécessités des personnes ayant des besoins spécifiques, comprenant les personnes en situation de handicap, mais également les personnes avec une poussette ou un bagage [11]. L'espace urbain dispose d'infrastructures pour permettre à une Personne Concernée par la Déficience Visuelle (PCDV) de se repérer et de confirmer le cheminement qu'elle suit. À ce titre, en France, le Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) produit des documents techniques à destination des aménageurs pour les guider sur les dispositifs existants et les bonnes pratiques pour les implanter (voir 1.3).

Les modèles de données standardisés utilisés dans les domaines de l'urbanisme et du transport peuvent intégrer une dimension liée à l'accessibilité. En France, la Loi d'Orientation des Mobilités (LOM), promulguée en 2019, impose aux collectivités de collecter et publier les données d'accessibilité de la voirie à 200 mètres autour des arrêts de transports en commun. Le formalisme utilisé, le géostandard accessibilité normalisé par le Conseil National de l'Information Géolocalisée (CNIG), est un dérivé du Network Timetable Ex-

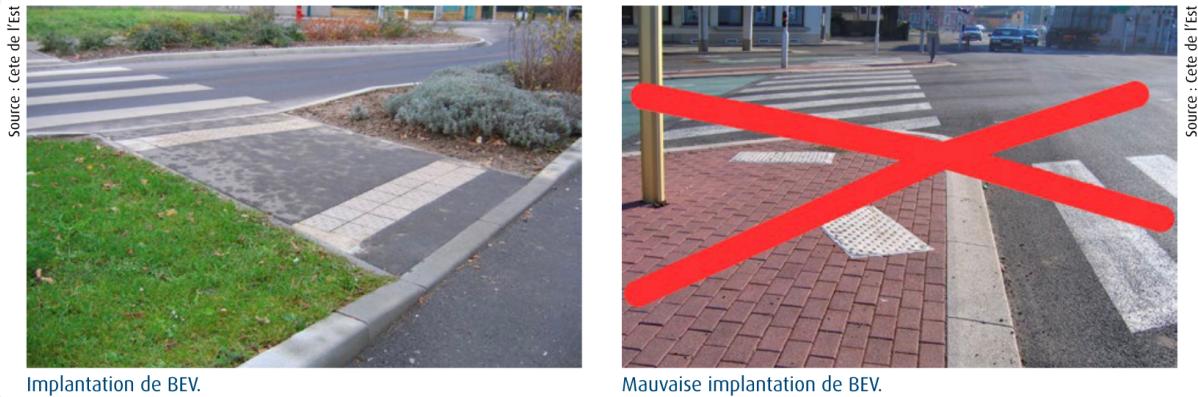


FIGURE 1.3 – Exemple issu de [1] sur les bonnes pratiques d’implantation de BEV.

change (NeTEx) pensé pour la description fine des cheminements piéton. Le NeTEx est un format européen de description des réseaux de transports qui couvre un périmètre fonctionnel plus large que le géostandard du CNIG. Il permet déjà de représenter les cheminements piétons, mais avec une précision sémantique moindre. Il vise à supplanter en Europe la norme General Transit Feed Specification (GTFS), prévue pour le même usage, mais moins précise sur les questions d’accessibilité. D’autres formalismes plus généraux peuvent être mobilisés. CityGML [12], pensé pour proposer une représentation 3D de l’espace urbain, est prévu pour être étendu à des usages spécifiques [13]. Cette possibilité est par exemple exploitée par [14] pour y intégrer les cheminements piéton et leurs conditions d’accessibilité.

L’émergence de l’Information Géographique Volontaire (IGV) a apporté une nouvelle perspective à la collecte de données, permettant d’augmenter leur disponibilité sur des zones et des thèmes auparavant peu couverts [15], dont l’accessibilité. OpenStreetMap (OSM) est une base de données géographique généraliste, libre et collaborative couvrant une échelle mondiale. Son modèle repose sur un système de clés-valeurs¹ souple, dont les associations permettent de décrire une très grande diversité d’objets. L’utilisation des clés et leur valeur associée pour un objet est discutée et documentée sur le wiki du projet [16].

1.2.2 Les bases de données existantes

L’acquisition des données géographiques est un processus généralement mené par des professionnels. Cela est également vrai pour les données d’accessibilité pour lesquelles la précision demandée nécessite une opération manuelle particulièrement longue et des relevés sur le terrain [17]. En France, la disponibilité de ces données d’accessibilité est essentiellement éparses au sein des portails de données ouvertes de chaque collectivité. On peut par exemple évoquer le portail Paris Data qui donne accès à une donnée sur les trottoirs précise, ainsi qu’à des données temporelles utiles dans un contexte de mobilité telles que la présence de travaux sur la voie. Cependant, les modèles utilisés sont aujourd’hui propres à chaque collectivité, et leur disponibilité et leur précision varient d’un territoire à l’autre [11].

Sur OSM, [18] montre que les données d’accessibilité sont également éparses, leur complétude pouvant varier d’une ville à l’autre. Par ailleurs, leur modélisation et leur précision sont également hétérogènes [19] en ce qui concerne les trottoirs.

1. Sur OSM, une clé est nommée tag.

1.3 Les dispositifs pour rendre accessibles les données géographiques

Les données géographiques peuvent être utilisées pour concevoir des cartes, mais également au sein de dispositifs sensoriels permettant à une personne aveugle de les explorer. Pour cela, il est nécessaire d'en proposer une représentation accessible par d'autres sens que la vue. Cette partie s'intéresse à présenter les dispositifs décrits au sein de la littérature, ainsi que ceux effectivement mobilisés dans leur quotidien par les personnes concernées.

1.3.1 Les descriptions autosuffisantes

Une carte mentale construite à partir d'une description verbale partage ses propriétés avec une carte mentale dérivée d'une expérience visuelle, dont les relations spatiales entre les entités [20]. Par ailleurs, elle permet d'inférer des relations spatiales non explicitement indiquées dans la description, et ainsi d'adopter un point de vue exocentrique [21]. Une description verbale peut ainsi être mobilisée par les personnes concernées par la déficience visuelle afin de construire une représentation mentale d'un espace.

La littérature se concentre principalement sur la description d'itinéraires. Du point de vue des sciences cognitives, de nombreux travaux se sont intéressés aux principes et pratiques pour communiquer efficacement la connaissance d'un itinéraire, en analysant les éléments qui le constituent et influent sur sa qualité [22, 23]. Les recherches qui se focalisent sur la question de la déficience visuelle abordent la description d'itinéraires en fonction des environnements intérieurs ou extérieurs.

Un modèle pour la création de description d'itinéraires en intérieur est proposé par [24]. Il repose sur des descriptions validées par des utilisateurs concernés et comprend plusieurs séquences de directions augmentées de repères. Une approche similaire est abordée par [25] pour le guidage au sein d'un commerce, dont les descriptions sont générées automatiquement à l'aide d'un graphe topologique représentant ce dernier.

Pour le guidage extérieur, [2] décrit une suite d'instructions de guidage auxquelles sont associées une forme verbale, permettant de décrire un cheminement au sein de la ville. Celui-ci peut notamment comprendre une indication d'orientation angulaire ou relative à une voie de circulation. Une autre grammaire de description est élaborée par [26]. [27] proposent une approche similaire et génèrent automatiquement les descriptions à l'aide d'un graphe piéton enrichi par des repères. Chaque instruction est basée sur un patron et déclenchée selon le type de segment parcouru.

Il existe peu de littérature visant spécifiquement la manière de décrire un carrefour. On peut cependant citer les travaux de [2] qui intègrent au sein de l'itinéraire une description basique des carrefours, indiquant leur nombre de branches ainsi que l'orientation de chacune d'elle (voir 1.4).

La génération automatique de description de carrefours est adressée par [28]. En se basant sur la littérature en instruction et mobilité, ils proposent un schéma de base de données non relationnel contenant les principaux attributs permettant de décrire le carrefour, sa forme et les équipements permettant de le traverser. La description générée n'est pas phrasée mais verbalisée sous la forme de séquence d'éléments. Par ailleurs, la base de données n'est pas dérivée de données réelles.

It is a four-branch intersection.
 At [a] hrs, there is [w] street; at [b] h¹, there is [x] street;
 at [c] h, there is [y] street and at [d] h, there is [z] street.
[a] street intersects with [b] street.

FIGURE 1.4 – La description des carrefours proposée par [2] est intégrée à l’itinéraire. Les branches du carrefour sont indiquées.



FIGURE 1.5 – Exemples de cartes tactiles imprimées sur du papier thermogonflé.

1.3.2 Les cartes en relief

Les cartes en reliefs (voir 1.5) permettent d’explorer une représentation de la donnée géographique accessible au toucher. Elles sont souvent réalisées manuellement par les instructeurs pour l’autonomie et les adaptateurs-transcripteurs (voir 1.1.2). La revue de littérature de [29] rappelle qu’elles répondent à des règles de conception précises afin de permettre à leur lecteur de les comprendre et d’en distinguer les différents éléments.

La génération automatique de cartes en relief basées sur des données géographiques présente de nombreux défis scientifiques et techniques. Une revue de littérature proposée par [30] présente de manière exhaustive les différentes approches existantes. Si d’autres travaux ont adressé la génération de carte à petite échelle, l’état de l’art ci-dessous se concentre sur l’échelle de la rue.

La proposition de [31], TMAP, permet la réalisation à la demande de cartes tactiles des linéaires de rues. Un service interactif permet à l’utilisateur de définir une emprise et de personnaliser la conception, par exemple au niveau de l’échelle et des éléments labellisés. Ces options vont servir à styliser la donnée, puis la carte est réalisée à l’aide d’une embosseuse braille². Cependant, le linéaire de rues utilisé pour générer les cartes provient d’une base de données limitée au territoire américain.

[32] proposent une approche équivalente sur le territoire japonais, en proposant une infrastructure technique applicable à d’autres territoires sous réserve de disponibilité de données géographiques équivalentes. La carte est cette fois réalisée par thermogonflage³. Ils insistent par ailleurs sur l’intérêt des repères sensoriels, qui peuvent différer selon l’utilisateur, ce qui implique d’en permettre la personnalisation.

Les dispositifs précédents sont étendus par [33, 34] en utilisant la base de données OpenStreetMap comme source afin de permettre la génération de carte tactile sur n’im-

2. Une embosseuse braille est une imprimante qui permet de retranscrire en relief des caractères brailles. Les machines étant coûteuses et bruyantes, l’embossage tend à être remplacé par le thermogonflage.

3. Le thermogonflage consiste à imprimer un document en noir et blanc sur un papier spécial contenant des microcapsules. Ces dernières gonflent de manière uniforme sur les zones imprimées lorsque le papier est passé au four.

Publication	Technique	Généralisé	Automatisé	Couverture	Échelle	Support
[31]	Stylisation	Non	Complet	États-Unis	Rues	Embossage
[32]	Stylisation	Non	Complet	Japon	Rues	Thermogonflage
[33, 34]	Stylisation	Non	Complet	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[35]	Stylisation	Oui	Partiel	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[37]	Apprentissage profond	Non	Complet	Mondiale	Rues	Impression 3D
[38]	Stylisation	Oui	Partiel	Mondiale	Carrefours	Thermogonflage

TABLE 1.1 – Résumé des points abordés pour chaque entrée de l'état de l'art sur les cartes tactiles.

porte quel territoire.

Les travaux évoqués jusqu'ici reposent sur une stylisation de la donnée géographique. Cette dernière n'a cependant pas été pensée pour une représentation tactile et peut présenter des formes complexes difficiles à discerner. [35] s'appuient sur les approches précédentes en insistant sur l'intérêt du processus de généralisation pour la bonne distinction des différents éléments qui composent la carte. Les processus de généralisation pouvant donner un résultat inadéquat, une édition manuelle de la carte reste possible.

[36] proposent d'aller au-delà de la généralisation pour "schématiser" la carte, c'est-à-dire en proposer une représentation abstraite plus adaptée aux zones urbaines denses.

Les bases de données vectorielles, bien qu'ayant parfois une couverture mondiale, n'assurent pas une exhaustivité sur leur échelle entière sur le thème de l'accessibilité. L'imagerie aérienne, en fonction de sa résolution, peut permettre de distinguer ces éléments. [37] s'intéressent à cette problématique en proposant de générer des cartes en relief par apprentissage profond en utilisant à la fois une photographie aérienne et un filaire de rues vectoriel.

Le sujet de la génération de cartes tactiles à l'échelle spécifique du carrefour est adressé au sein du projet ACTIVmap par [38] en utilisant les données OpenStreetMap et en accordant une attention particulière aux échelles et niveaux de détails requis.

Les travaux de génération de cartes tactiles reposent sur des techniques différentes. Ils ne s'intéressent pas à la même échelle ni à la même emprise, et les supports de réalisation visés sont également variés (voir 1.1). Dans tous les cas, la carte en relief seule ne permet pas de représenter une haute densité d'informations [36], et est plus abordable lorsqu'elle est complétée d'une information sonore [39]. Ce sujet est abordé dans 1.3.3.

1.3.3 Les cartes sonores et audiotactiles

Un état des lieux des techniques mobilisables pour sonoriser les données géographiques est proposé par [40], qui distingue notamment les sons réalistes, qui peuvent correspondre à une description verbale ou un son imitant le réel, et les sons abstraits.

Parmi les sons réalistes, on trouve notamment les paysages sonores. [41] définit un paysage sonore comme « l'environnement sonore global d'une région ». Il représente l'ambiance sonore telle qu'elle est réellement perçue en un lieu. La proposition de [42] s'appuie sur la notion de paysage sonore pour sonoriser une carte topographique en associant un

son à chaque couleur et en modulant son volume selon sa dominance dans la carte. Le son produit peut ainsi représenter un paysage sonore. Une alternative sous la forme d'une composition musicale originale est également proposée et répond plutôt à la définition d'un son abstrait tel que proposé par [40].

Ces derniers sont modulés par des variables sonores telles que le volume ou la durée et peuvent être directement corrélés à des données. C'est l'approche choisie par [43] qui proposent d'explorer les données continues telles que les Modèles Numériques de Terrain (MNT) en faisant correspondre leurs valeurs aux variables sonores.

Les techniques évoquées ci-dessus visent à explorer des données par le son uniquement. Mais, comme le propose [40], ce dernier peut être utilisé de concert avec un autre dispositif sensoriel pour proposer une représentation multimodale apportant une dimension supplémentaire à la visualisation, cette dernière pouvant être utilisée pour représenter une variable supplémentaire. C'est dans ce sens que la proposition de [44] modélise la précision positionnelle de bâtiments en établissant un son spécifique pour chaque valeur de cette variable. Une approche similaire de [45] s'intéresse à la durée des incendies en modulant la longueur du son joué au survol d'une entité.

Ces dispositifs multimodaux utilisent une interface d'ordinateur standard pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec la carte, rendant leur usage impossible par un utilisateur déficient visuel. Pour répondre à cette problématique, la littérature s'est intéressée à la sonorisation des cartes tactiles.

Les cartes dites audio-tactiles se sont développées sur la base des dispositifs en relief interactifs. On en trouve de nombreux exemples parmi lesquels [46] ou encore [47], basés sur une interface tactile reliée à un ordinateur et permettant d'interagir avec celui-ci à l'aide d'un programme spécifique. Talking TMAP [48] est une extension de TMAP [31] permettant d'interagir avec la carte pour obtenir des informations sur l'élément touché par synthèse vocale et repose sur le matériel conçu par [47]. L'émergence des écrans tactiles grand public a permis la conception d'outils plus accessibles [39] comme DE

1.3.4 Les dispositifs d'aide in-situ

Pour cheminer en ville, un PCDV peut utiliser des outils d'aides in-situ pour s'orienter et éviter les obstacles. Il existe deux principales familles d'outils : les outils indépendants et ceux qui reposent sur un second équipement externe. L'enquête Homère, qui s'est également intéressée aux dispositifs mobilisés lors des déplacements, montre qu'une majorité des personnes concernées utilise des dispositifs de ce type, en particulier les outils de navigation [3]. Une revue plus exhaustive des dispositifs existants est proposée par [49].

On entend par outils indépendants les outils qui ne nécessitent pas d'équipement externe et qui peuvent donc être utilisés en tout lieu. Les principaux représentants de cette catégorie sont les outils de navigation, qui permettent à leur utilisateur de se localiser et d'obtenir un audioguidage vers une destination. La littérature propose plusieurs usages de ces outils pour guider les PCDVs, en mobilisant un système de positionnement GNSS et SIG [50]. Les questions de génération de texte pour ces usages sont abordées dans la section 1.3.1. Au-delà de la recherche, il existe également des dispositifs spécialisés utilisables au quotidien, qu'il s'agisse d'applications mobiles (v 1.6) ou de matériels



FIGURE 1.6 – Sonarvision : un exemple d’application de guidage qui repose sur le GNSS et la caméra d’un smartphone. Source : <https://youtu.be/geGq59f11z0>.

spécifiques comme Global Positioning Systems (GPSs) [51].

Les dispositifs qui se reposent sur des capteurs embarqués permettent le positionnement et la détection d’obstacles. La littérature s’est notamment intéressée aux cannes électroniques. Plusieurs dispositifs ont été étudiés pour la détection d’obstacle à l’aide de capteurs laser ou infrarouge [52]. Certains utilisent ces capteurs pour localiser l’utilisateur sur la base d’une cartographie d’un lieu [53]. Les caméras embarquées peuvent également servir d’outil de positionnement à l’aide d’algorithmes de vision par ordinateur [54].

D’autres outils d’aide in-situ se reposent sur des dispositifs qui équipent le lieu visité. Il peut s’agir de balises de guidage qui peuvent servir d’outils d’orientation en extérieur et en intérieur [55, 56]. [57] proposent un système similaire dédié à la traversée des carrefours. De nombreux lieux, tels que les carrefours, sont également équipés de balises sonores. Celles que l’on retrouve en France répondent à la norme NF S32-002 [58] et s’activent à l’aide d’une télécommande standardisée.

1.3.5 La réalité virtuelle et les maquettes interactives

En l’absence de vision, il existe d’autres modalités permettant d’explorer un environnement en réalité virtuelle, par le toucher et par le son. On définit ici la réalité virtuelle comme un moyen immersif et interactif d’explorer un environnement à distance.

Les cartes tactiles que nous présentions en 1.3.2 s’exploront en utilisant un point de vue exocentré : l’utilisateur n’est pas placé virtuellement au sein de la carte. C’est ce que propose TangibleSpace [59] qui permet à l’utilisateur de déplacer une figurine virtuelle au sein d’une maquette.

D’autres dispositifs basés sur le son permettent à un utilisateur concerné de s’immerger dans un environnement virtuel. [60] propose une salle d’immersion sonore utilisable dans un contexte d’instruction en mobilité permettant, avec un placement d’enceintes spécifique, de jouer des sons spatialisés et simuler un environnement urbain.

Le système proposé par [61] est basé sur une application mobile pour suivre virtuellement un guigade GPS et construire une carte mentale du trajet. Enfin, [62] s’inspire des jeux d’aventures textuels pour micro-ordinateurs pour construire un graphe d’exploration

Production		Localisation		Interaction		Référentiel		Usage		Échelle

TABLE 1.2 – Résumé des modalités de chaque entrée de l'état de l'art.

depuis un plan d'intérieur navigable textuellement de manière interactive.

1.4 Synthèse et conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux problématiques spécifiques aux déplacement des PCDVs en milieu urbain. Nous avons vu que le carrefour est une zone particulièrement complexe à traverser et qu'il n'existe, à l'heure actuelle, que peu de travaux s'intéressant spécifiquement à cet espace : les bases de données sont lacunaires sur cet aspect, et les travaux académiques, bien qu'inspirants, ne permettent pas de générer automatiquement une représentation accessible d'un carrefour.

Pour répondre à cette problématique, les travaux présentés dans cette thèse se concentreront sur deux aspects :

- Proposer un modèle de données permettant de représenter le carrefour et son accessibilité, en permettant sa génération depuis des données ouvertes.
- Proposer une description du carrefour générable à partir du modèle de données précédent, mais également personnalisable pour répondre aux besoins variés des personnes concernées.

Chapitre 2

La modélisation du carrefour

TODO

2.1 Le carrefour pour une personne déficiente visuelle

TODO

2.1.1 La structure globale du carrefour

TODO

2.1.2 Trottoirs et traversées : la structure en graphe du carrefour

TODO

2.1.3 Les repères au sein du carrefour

2.2 La modélisation d'un carrefour au sein d'OpenStreetMap

TODO

2.2.1 Une forte capacité de représentation

TODO

2.2.2 Des variations dans les modélisations

TODO

2.3 Un modèle de carrefour

TODO

2.3.1 OSM-Objet : une modélisation objet de la donnée OpenStreetMap

TODO

2.3.2 Application à la modélisation du carrefour

TODO

2.3.3 Instancier le modèle depuis OpenStreetMap

TODO

Chapitre 3

La description du carrefour

TODO

3.1 La description exocentrale

TODO

3.1.1 Une description générale

TODO

3.2 La description égocentrale

TODO

3.2.1 Une description interactive

TODO

3.3 La description "à la carte"

TODO

3.3.1 Pourquoi permettre de personnaliser la description

TODO

3.3.2 Le texte comme un style cartographique

TODO

3.4 La description dans la carte

TODO

3.4.1 Fusion de la carte et du texte

TODO

Chapitre 4

Implémentation

TODO

4.1 La description égocentré en fiction hypertexte

TODO

4.2 Du graphe OpenStreetMap à la description exo-centrée

TODO

4.3 Un plugin QGIS pour personnaliser la description

TODO

Chapitre 5

Évaluation

TODO

5.1 Évaluation des descriptions

TODO

5.2 Évaluation du modèle

TODO

5.3 Évaluation du pipeline de conception de description

TODO

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

TODO

6.1 Discussion générale

TODO

6.2 Aller au-delà du carrefour

TODO

6.3 L'apport de l'intelligence artificielle

TODO

6.4 Conclusion

TODO

Bibliographie

- [1] CEREMA. Les cheminements des personnes aveugles et malvoyantes, January 2022.
- [2] Florence Gaunet. Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas. *Universal Access in the Information Society*, 4(4) : 338–353, May 2006. ISSN 1615-5289, 1615-5297. doi : 10.1007/s10209-003-0086-2. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10209-003-0086-2>.
- [3] Caroline Pigeon, Nicolas Baltenneck, Anna Rita Galiano, and Gérard Uzan. Étude homère - Étude nationale sur la déficience visuelle. Technical report, 2023.
- [4] Agathe Ratelle and Julie-Anne Couturier. *Manuel d'intervention en orientation et mobilité*. PU Montréal, January 2019. ISBN 978-2-7606-3905-8.
- [5] Jodi Brazier. The Benefits of Using Echolocation to Safely Navigate Through the Environment. *Vision Rehabilitation International*, 1(1) :46–51, January 2008. doi : 10.21307/ijom-2008-005. URL <https://sciendo.com/article/10.21307/ijom-2008-005?tab=figures-tables>.
- [6] R. Dan Jacobson. Cognitive Mapping Without Sight : Four preliminary studies of spatial learning. *Journal of Environmental Psychology*, 18(3) :289–305, September 1998. ISSN 0272-4944. doi : 10.1006/jenv.1998.0098. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494498900986>.
- [7] Nicholas Giudice and R.G. Long. Establishing and Maintaining Orientation for Orientation and Mobility. pages 45–62. January 2010.
- [8] Lisa Denis, Jérémie Kalsron, and Jean-Marie Favreau. Représenter l'espace urbain pour les personnes concernées par le handicap visuel. 2023.
- [9] Christina Aschan-Leygonie, Claire Cunty, and Paule-Annick Davoine. *Les systèmes d'information géographique*. Armand Colin, October 2019. ISBN 978-2-200-61718-9.
- [10] M.P. Palacio, D. Sol, and J. Gonzalez. Graph-based knowledge representation for GIS data. In *Proceedings of the Fourth Mexican International Conference on Computer Science, 2003. ENC 2003.*, pages 117–124, September 2003. doi : 10.1109/ENC.2003.1232884.
- [11] Chaohai Ding, Mike Wald, and Gary Wills. A survey of open accessibility data. In *Proceedings of the 11th Web for All Conference*, W4A '14, pages 1–4, New York, NY, USA, April 2014. Association for Computing Machinery. ISBN 978-1-4503-2651-3. doi : 10.1145/2596695.2596708. URL <https://doi.org/10.1145/2596695.2596708>.

- [12] Gerhard Gröger and Lutz Plümer. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71 :12–33, July 2012. ISSN 0924-2716. doi : 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612000779>.
- [13] Filip Biljecki, Kavisha Kumar, and Claus Nagel. CityGML Application Domain Extension (ADE) : Overview of developments. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1) :13, August 2018. ISSN 2363-7501. doi : 10.1186/s40965-018-0055-6. URL <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6>.
- [14] Bradley Wheeler, Meirman Syzdykbayev, Hassan A. Karimi, Raanan Gurewitsch, and Yanbo Wang. Personalized accessible wayfinding for people with disabilities through standards and open geospatial platforms in smart cities. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 5(1) :2, December 2020. ISSN 2363-7501. doi : 10.1186/s40965-020-00075-5. URL <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-020-00075-5>.
- [15] Michael F. Goodchild. Citizens as sensors : The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4) :211–221, November 2007. ISSN 0343-2521, 1572-9893. doi : 10.1007/s10708-007-9111-y. URL <http://link.springer.com/10.1007/s10708-007-9111-y>.
- [16] Andrea Ballatore and Peter Mooney. Conceptualising the geographic world : The dimensions of negotiation in crowdsourced cartography. *International Journal of Geographical Information Science*, 29, August 2015. doi : 10.1080/13658816.2015.1076825.
- [17] Linda Beale, Kenneth Field, David Briggs, Phil Picton, and Hugh Matthews. Mapping for Wheelchair Users : Route Navigation in Urban Spaces. *The Cartographic Journal*, 43(1) :68–81, March 2006. ISSN 0008-7041. doi : 10.1179/000870406X93517. URL <https://doi.org/10.1179/000870406X93517>.
- [18] Amin Mobasher, Yeran Sun, Lukas Loos, and Ahmed Loai Ali. Are Crowdsourced Datasets Suitable for Specialized Routing Services ? Case Study of OpenStreetMap for Routing of People with Limited Mobility. *Sustainability*, 9(6) :997, June 2017. ISSN 2071-1050. doi : 10.3390/su9060997. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/6/997>.
- [19] L. Biagi, M. A. Brovelli, and L. Stucchi. Mapping the accessibility in OpenStreetMap : A comparison of different techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B4-2020 :229–236, August 2020. ISSN 2194-9034. doi : 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-229-2020. URL <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B4-2020/229/2020/>.
- [20] Michel Denis and Michel Zimmere. Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions. *Psychological Research*, 54(4) :286–298, December 1992. ISSN 1430-2772. doi : 10.1007/BF01358266. URL <https://doi.org/10.1007/BF01358266>.

- [21] Marios N. Avraamides, Jack M. Loomis, Roberta L. Klatzky, and Reginald G. Golledge. Functional equivalence of spatial representations derived from vision and language : evidence from allocentric judgments. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 30(4) :804–814, July 2004. ISSN 0278-7393. doi : 10.1037/0278-7393.30.4.804.
- [22] Gary L. Allen. Principles and practices for communicating route knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 14(4) :333–359, 2000. ISSN 1099-0720. doi : 10.1002/1099-0720(200007/08)14:4<333::AID-ACP655>3.0.CO;2-C. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1099-0720%28200007/08%2914%3A4%3C333%3A%3AAID-ACP655%3E3.0.CO%3B2-C>.
- [23] Kristin L. Lovelace, Mary Hegarty, and Daniel R. Montello. Elements of Good Route Directions in Familiar and Unfamiliar Environments. In Christian Freksa and David M. Mark, editors, *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science*, Lecture Notes in Computer Science, pages 65–82, Berlin, Heidelberg, 1999. Springer. ISBN 9783540483847. doi : 10.1007/3-540-48384-5_5.
- [24] Johannes Tröger, Sarah Schnebelt, and Jan Alexandersson. Modelling the Creation of Verbal Indoor Route Descriptions for Visually Impaired Travellers. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pages 355–377. Springer International Publishing, Cham, 2020. ISBN 9783030164508. doi : 10.1007/978-3-030-16450-8_15. URL https://doi.org/10.1007/978-3-030-16450-8_15.
- [25] Vladimir Kulyukin, John Nicholson, and Daniel Coster. ShopTalk : Toward independent shopping by people with visual impairments. pages 241–242, October 2008. doi : 10.1145/1414471.1414518.
- [26] Angela Constantinescu, Vanessa Petrausch, Karin Müller, and Rainer Stiefelhagen. Towards a Standardized Grammar for Navigation Systems for Persons with Visual Impairments. In *Proceedings of the 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, ASSETS ’19, pages 539–541, New York, NY, USA, October 2019. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450366762. doi : 10.1145/3308561.3354618. URL <https://doi.org/10.1145/3308561.3354618>.
- [27] Jan Balata, Zdenek Mikovec, Petr Bures, and Eva Mulickova. Automatically generated landmark-enhanced navigation instructions for blind pedestrians. In *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, pages 1605–1612, September 2016.
- [28] David A. Guth, Janet M. Barlow, Paul E. Ponchillia, Lee A. Rodegerdts, Dae Shik Kim, and Kevin H. Lee. An Intersection Database Facilitates Access to Complex Signalized Intersections for Pedestrians with Vision Disabilities. *Transportation Research Record*, 2673(2) :698–709, February 2019. ISSN 0361-1981. doi : 10.1177/0361198118821673. URL <https://doi.org/10.1177/0361198118821673>.
- [29] Jakub Wabiński, Albina Mościcka, and Guillaume Touya. Guidelines for Standardizing the Design of Tactile Maps : A Review of Research and Best Practice. *The Cartographic Journal*, 59(3) :239–258, July 2022. ISSN 0008-7041. doi : 10.1080/00087041.2022.2097760. URL <https://doi.org/10.1080/00087041.2022.2097760>.

- [30] Jakub Wabiński and Albina Mościcka. Automatic (Tactile) Map Generation—A Systematic Literature Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(7) :293, July 2019. ISSN 2220-9964. doi : 10.3390/ijgi8070293. URL <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/7/293>.
- [31] Joshua A. Miele. Tactile map automated production (tmap) : Using gis data to generate braille maps. In *Proceedings of CSUN International Conference on Technology and Persons with Disabilities*, 2004.
- [32] Kazunori Minatani, Tetsuya Watanabe, Toshimitsu Yamaguchi, Ken Watanabe, Joji Akiyama, Manabi Miyagi, and Susumu Ouchi. Tactile Map Automated Creation System to Enhance the Mobility of Blind Persons—Its Design Concept and Evaluation through Experiment. In Klaus Miesenberger, Joachim Klaus, Wolfgang Zagler, and Arthur Karshmer, editors, *Computers Helping People with Special Needs*, Lecture Notes in Computer Science, pages 534–540, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer. ISBN 9783642141003. doi : 10.1007/978-3-642-14100-3_80.
- [33] Tetsuya Watanabe, Toshimitsu Yamaguchi, Satoko Koda, and Kazunori Minatani. Tactile Map Automated Creation System Using OpenStreetMap. In Klaus Miesenberger, Deborah Fels, Dominique Archambault, Petr Peňáz, and Wolfgang Zagler, editors, *Computers Helping People with Special Needs*, Lecture Notes in Computer Science, pages 42–49, Cham, 2014. Springer International Publishing. ISBN 9783319085999. doi : 10.1007/978-3-319-08599-9_7.
- [34] Petr Červenka, Karel Břinda, Michaela Hanousková, Petr Hofman, and Radek Seifert. Blind Friendly Maps. In Klaus Miesenberger, Christian Bühler, and Petr Penaz, editors, *Computers Helping People with Special Needs*, Lecture Notes in Computer Science, pages 131–138, Cham, 2016. Springer International Publishing. ISBN 9783319412672. doi : 10.1007/978-3-319-41267-2_18.
- [35] Radim Štampach and Eva Mulíčková. Automated generation of tactile maps. *Journal of Maps*, 12(sup1) :532–540, November 2016. ISSN null. doi : 10.1080/17445647.2016.1196622. URL <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1196622>.
- [36] Guillaume Touya, Sidonie Christophe, Jean-Marie Favreau, and Amine Ben Rhaiem. Automatic derivation of on-demand tactile maps for visually impaired people : first experiments and research agenda. *International Journal of Cartography*, 5(1) :67–91, January 2019. ISSN 2372-9333. doi : 10.1080/23729333.2018.1486784. URL <https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1486784>.
- [37] Gauthier Fillières-Riveau, Jean-Marie Favreau, Vincent Barra, and Guillaume Touya. Génération de cartes tactiles photoréalistes pour personnes déficientes visuelles par apprentissage profond. *Revue Internationale de Géomatique*, 30(1-2) : 105–126, January 2020. ISSN 1260-5875, 2116-7060. doi : 10.3166/rig.2020.00104. URL <https://rig.revuesonline.com/articles/lvrig/abs/2020/04/rig00104/rig00104.html>.
- [38] Yuhao Jiang, Maria-Jesús Lobo, Sidonie Christophe, and Christophe Jouffrais. Semi-automated Pipeline to Produce Customizable Tactile Maps of Street Intersections for People with Visual Impairments. *AGILE : GIScience Series*, 4 :1–8, June 2023. doi : 10.5194/agile-giss-4-29-2023.

- [39] Anke M. Brock, Philippe Truillet, Bernard Oriola, Delphine Picard, and Christophe Jouffrais. Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People. *Human–Computer Interaction*, 30(2) :156–194, March 2015. ISSN 0737-0024. doi : 10.1080/07370024.2014.924412. URL <https://doi.org/10.1080/07370024.2014.924412>.
- [40] JOHN B. Krygier. Chapter 8 - Sound and Geographic Visualization. volume 2 of *Visualization in Modern Cartography*, pages 149–166. Academic Press, January 1994. doi : 10.1016/B978-0-08-042415-6.50015-6. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080424156500156>.
- [41] J. Douglas Porteous and Jane F. Mastin. Soundscape. *Journal of Architectural and Planning Research*, 2(3) :169–186, 1985. ISSN 0738-0895.
- [42] Didier Josselin, Dorian Roussel, Said Boulaouk, Abdelberry Saidi, Driss Matrouf, Olivier Bonin, and Eitan Altman. Sonorous cartography for sighted and blind people. June 2016. URL <https://hal.science/hal-01338081>.
- [43] Joram Schito and Sara Irina Fabrikant. Exploring maps by sounds : using parameter mapping sonification to make digital elevation models audible. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(5) :874–906, May 2018. ISSN 1365-8816. doi : 10.1080/13658816.2017.1420192. URL <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1420192>.
- [44] Nick Bearman and Andrew Lovett. Using Sound to Represent Positional Accuracy of Address Locations. *The Cartographic Journal*, 47(4) :308–314, November 2010. ISSN 0008-7041. doi : 10.1179/000870410X12911302296833. URL <https://doi.org/10.1179/000870410X12911302296833>.
- [45] Aikaterini Foteinou, Margarita Kokla, Eleni Tomai, and Marinos Kavouras. Sonification of Spatial Data : An Online Audiovisual Cartographic Representation of Fire Incidents. *AGILE : GIScience Series*, 3 :35, June 2022. ISSN 2700-8150. doi : 10.5194/agile-giss-3-35-2022. URL <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGILE...3...35F>. ADS Bibcode : 2022AGILE...3...35F.
- [46] Jürgen Lötzsch. Computer-aided access to tactile graphics for the blind. In Wolfgang L. Zagler, Geoffrey Busby, and Roland R. Wagner, editors, *Computers for Handicapped Persons*, Lecture Notes in Computer Science, pages 575–581, Berlin, Heidelberg, 1994. Springer. ISBN 9783540489894. doi : 10.1007/3-540-58476-5_188.
- [47] Steven Landau and K. Gourgey. Development of a Talking Tactile Tablet. *Information Technology and Disabilities*, April 2001. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-a-Talking-Tactile-Tablet-Landau-Gourgey/46b57cad3779295df806d53999619465ba8b2024>.
- [48] Joshua A. Miele, Steven Landau, and Deborah Gilden. Talking TMAP : Automated generation of audio-tactile maps using Smith-Kettlewell’s TMAP software. *British Journal of Visual Impairment*, 24(2) :93–100, May 2006. ISSN 0264-6196. doi : 10.1177/0264619606064436. URL <https://doi.org/10.1177/0264619606064436>.

- [49] Bineeth Kuriakose, Raju Shrestha, and Frode Eika Sandnes. Tools and Technologies for Blind and Visually Impaired Navigation Support : A Review. *IETE Technical Review*, 39(1) :3–18, January 2022. ISSN 0256-4602. doi : 10.1080/02564602.2020.1819893. URL <https://doi.org/10.1080/02564602.2020.1819893>.
- [50] Reginald G. Golledge, Roberta L. Klatzky, Jack M. Loomis, Jon Speigle, and Jerome Tietz. A geographical information system for a GPS based personal guidance system. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7) :727–749, November 1998. ISSN 1365-8816. doi : 10.1080/136588198241635. URL <https://doi.org/10.1080/136588198241635>.
- [51] Pierre Refuveille. Les nouvelles technologies à l’usage des malvoyants et des non-voyants. *Revue Francophone d’Orthoptie*, 5(1) :29–39, January 2012. ISSN 1876-2204. doi : 10.1016/j.rfo.2012.03.005. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876220412000143>.
- [52] R Damaschini, Richard Legras, R Leroux, and René Farcy. Electronic Travel Aid for blind people. Lille, France, 2005.
- [53] Jean Connier, Hongling Shi, Shu Xu, Kun Mean, Philippe Vaslin, Jian-Jin Li, and Christophe De Vaulx. La canne blanche 2SEES : Concept et expérimentations. October 2018.
- [54] Ping-Jung Duh, Yu-Cheng Sung, Liang-Yu Fan Chiang, Yung-Ju Chang, and Kuan-Wen Chen. V-Eye : A Vision-Based Navigation System for the Visually Impaired. *IEEE Transactions on Multimedia*, 23 :1567–1580, 2021. ISSN 1941-0077. doi : 10.1109/TMM.2020.3001500.
- [55] Dragan Ahmetovic, Cole Gleason, Chengxiong Ruan, Kris Kitani, Hironobu Takagi, and Chieko Asakawa. NavCog : A navigational cognitive assistant for the blind. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI ’16, pages 90–99, New York, NY, USA, September 2016. Association for Computing Machinery. ISBN 978-1-4503-4408-1. doi : 10.1145/2935334.2935361. URL <https://doi.org/10.1145/2935334.2935361>.
- [56] Seyed Ali Cheraghi, Vinod Namboodiri, and Laura Walker. GuideBeacon : Beacon-based indoor wayfinding for the blind, visually impaired, and disoriented. In *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pages 121–130, March 2017. doi : 10.1109/PERCOM.2017.7917858.
- [57] Kiyoung Shin, Ryan McConville, Oussama Metatla, Minhye Chang, Chiyoung Han, Junhaeng Lee, and Anne Roudaut. Outdoor Localization Using BLE RSSI and Accessible Pedestrian Signals for the Visually Impaired at Intersections. *Sensors*, 22(1) :371, January 2022. ISSN 1424-8220. doi : 10.3390/s22010371. URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/371>.
- [58] NF S32-002, November 2004. URL <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-s32002/dispositifs-repetiteurs-de-feux-de-circulation-a-lusage-des-personnes-aveug/fa125183/650>

- [59] Julie Mulet, Lachezar Dimitrov, Anna Bartolucci, Mathieu Raynal, Valérie Tartas, Julie Ducasse, Marc J.-M. Macé, Bernard Oriola, Julie Lemarié, and Christophe Jouffrais. Évaluation d'un dispositif audio-tangible pour l'apprentissage spatial chez les enfants déficients visuels. In C. Jost and G. Uzan, editors, *11ème conférence de l'IFRATH sur les technologies d'assistance : Technologies pour l'autonomie et l'inclusion (Handicap 2020)*, volume Session 6 : Outils pédagogiques pour personnes aveugles, pages 157–162, Paris (en distanciel), France, November 2020. Institut Féderatif de Recherche sur les Aides Techniques pour personnes Handicapées (IFRATH), IFRATH. URL <https://hal.science/hal-02926462>.
- [60] Cathy Thomé. Faciliter et sécuriser les déplacements extérieurs pour les personnes en situation de handicap visuel via un entraînement auditif, September 2021.
- [61] João Guerreiro, Dragan Ahmetovic, Kris M. Kitani, and Chieko Asakawa. Virtual Navigation for Blind People : Building Sequential Representations of the Real-World. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pages 280–289, Baltimore Maryland USA, October 2017. ACM. ISBN 978-1-4503-4926-0. doi : 10.1145/3132525.3132545. URL <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3132525.3132545>.
- [62] Reza Arabsheibani, Ehsan Hamzei, Kimia Amoozandeh, Stephan Winter, and Martin Tomko. From Floorplan to Navigation Concepts : Automatic Generation of Text-based Games. *AGILE : GIScience Series*, 4 :1–15, June 2023. doi : 10.5194/agile-giss-4-2-2023. URL <https://agile-giss.copernicus.org/articles/4/2/2023/>.