

Commit 438db7d621216d11e1a9fc2d0de96bc3aea1564a

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*

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	23
2 La modélisation du carrefour	25
2.1 La structure globale du carrefour	25
2.1.1 Le graphe du carrefour du point de vue d'un piéton	25
2.1.2 Les repères au sein du carrefour	28
2.2 La modélisation d'un carrefour au sein d'OpenStreetMap	29
2.2.1 Une forte capacité de représentation	29
2.2.2 Des variations dans les modélisations	30
2.3 Un modèle de carrefour	31
2.3.1 OSM-Objet : une modélisation objet de la donnée OpenStreetMap .	31
2.3.2 Application à la modélisation du carrefour	33
2.4 Segmenter un carrefour dans le graphe d'OpenStreetMap (OSM)	34
2.4.1 Étapes d'une segmentation multi-échelle de carrefour	35
2.4.2 Détails du processus de segmentation	37
2.4.3 Calcul des informations piétonnes	41
2.5 Conclusion du chapitre	45
3 La description du carrefour	47
3.1 La description exocentrale	47
3.1.1 Une description générale	47
3.2 La description égocentrale	47
3.2.1 Une description interactive	47
3.3 La description "à la carte"	47

3.3.1	Pourquoi permettre de personnaliser la description	47
3.3.2	Le texte comme un style cartographique	47
3.4	La description dans la carte	47
3.4.1	Fusion de la carte et du texte	48
4	Implémentation	49
4.1	La description égocentré en fiction hypertexte	49
4.2	Du graphe OpenStreetMap à la description exocentré	49
4.3	Un plugin QGIS pour personnaliser la description	49
5	Évaluation	51
5.1	Évaluation des descriptions	51
5.2	Évaluation du modèle	51
5.3	Évaluation du pipeline de conception de description	51
6	Conclusions et perspectives	53
6.1	Discussion générale	53
6.2	Aller au-delà du carrefour	53
6.3	L'apport de l'intelligence artificielle	53
6.4	Conclusion	53

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
2.1	Ces deux trottoirs ne sont pas couvrants car ils possèdent un noeud en commun.	26
2.2	On remarque la différence entre une couverture routière incomplète et une couverture routière complète.	27
2.3	Le graphe multimodal d'un carrefour.	28
2.4	Les différents objets d'OSM peuvent chacun contenir des attributs.	29
2.5	Anatomie d'un carrefour dans OSM.	30
2.6	Les carrefours OSM à Paris.	31
2.7	Illustration des différentes modélisations de trottoirs possibles sur OSM. Source : Contributeurs OpenStreetMap.	32
2.8	Les pratiques de cartographies peuvent être localisées sur OSM. En Pologne, le filaire piéton s'est majoritairement développé au contraire de la Grande-Bretagne où il reste majoritairement présent en sémantique du réseau routier. Source : https://www.openstreetmap.org/user/Hungerburg/diary/395540	32
2.9	Modèle OSM-Objet.	33
2.10	Modèle CrModel.	34
2.11	Les bordures des carrefours sont situées au niveau des infrastructures, si elles existent. Fond de plan : Géoportail © IGN. Source : [3].	35
2.12	Exemple de région définie dans le graphe. Source : [3].	35
2.13	Résultat de la segmentation d'un carrefour élémentaire. Source : [3].	36
2.14	Résultat de l'assemblage des carrefours élémentaires. Source : [3].	36
2.15	Segmentation des branches depuis le carrefour fonctionnel de la figure 2.14b et utilisant les noms de rue donnés en figure 2.13a. Source : [3].	37
2.16	Deux noeuds graines où des régions élémentaires seront calculées. Source : [3].	38

2.17 Deux carrefours élémentaires dont la proximité entre les nœuds graines nécessite la prise en compte de la configuration des arêtes adjacentes. Ces deux carrefours élémentaires ont deux paires d'arêtes adjacentes ($\{\alpha, \beta\}$ et $\{\gamma, \delta\}$) avec le même nom, des directions consistantes, et des directions significativement différentes au regard du segment défini par les deux graines initiales. Source : [3].	40
2.18 Illustration du processus dans un rond-point. Source : [3].	42
2.19 La sémantique de chaque arête adjacente de ce carrefour contient le nom de la rue. On peut alors les grouper en utilisant ces noms et une direction consistante pour calculer les branches correspondantes : $\{a, b\}$, $\{c\}$, $\{d, e\}$, $\{f\}$. Source : [3].	43
2.20 Étapes de génération des trottoirs. Source : [4].	44
2.21 Étapes de génération des îlots. Source : [4].	44
2.22 Étapes de génération des traversées. Source : [4].	44

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
2.1	Équipements d'accessibilité au sein du carrefour.	28

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, 28, 29

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

CRDV Centre de Rééducation pour Déficients Visuels. 25

GNSS Global Navigation Satellite Systems. 7, 22, 23

GPS Global Positioning System. 22, 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

OSM OpenStreetMap. 5, 7, 18, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 43, 45

PCDV Personne Concernée par la Déficience Visuelle. 17, 19, 22, 23, 25, 28

PMR Personne à mobilité réduite. 28

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 audiodécrise.

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 [5]. 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 [6]. 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 [5].

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 1.3.4. L'ouïe joue également un rôle fort dans l'écholocation, c'est-à-dire la capacité à utiliser les échos pour percevoir les objets [7].

En cognition spatiale, une carte mentale correspond à un modèle conceptuel d'un

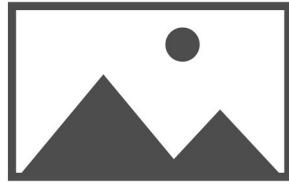


FIGURE 1.1 – Exemples de cartes tactiles concues par des instructeurs.

espace et des objets qui le composent [8]. Pour se 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 et de preuves [9], 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 l'ouïe (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) [10]. 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 visuelless (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, [6] 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 1.1. 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.

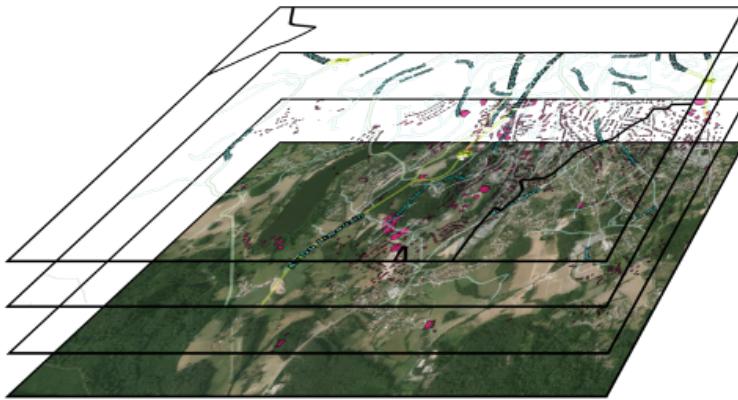


FIGURE 1.2 – Représentation en couches de données géographiques.

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) [11]. 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 [12].

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 [13]. L'espace urbain dispose d'infrastructures pour permettre à une Personne Concernnée par la Déficience Visuelle (PCDV) de se repérer et de confirmer le cheminement qu'elles 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 Exchange (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

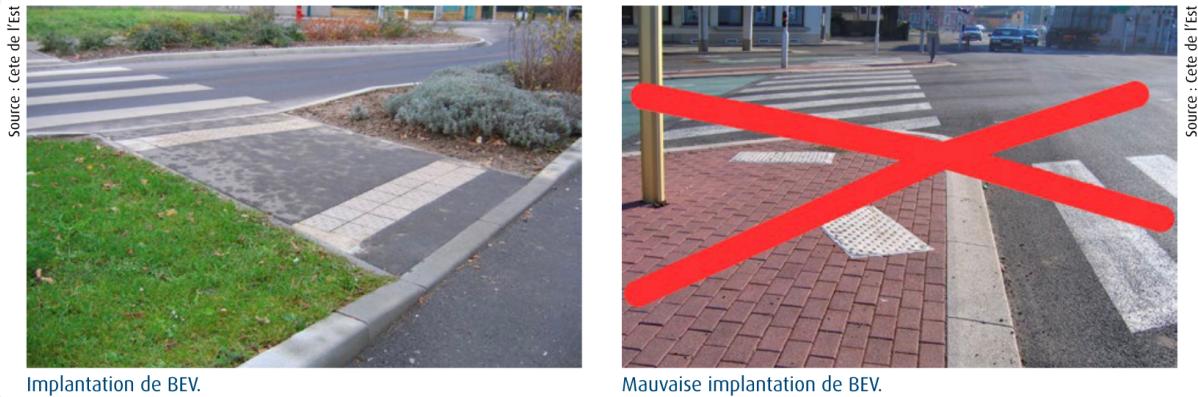


FIGURE 1.3 – Exemple issu de [1] sur les bonnes pratiques d’implantation de BEV.

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 formalisme plus généraux peuvent être mobilisés. CityGML [14], pensé pour proposer une représentation 3D de l’espace urbain, est prévu pour être étendu à des usages spécifiques [15]. Cette possibilité est par exemple exploitée par [16] 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 [17], dont l’accessibilité. 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 [18].

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 [19]. 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 [13].

Sur OSM, [20] 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 [21] 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 PCDV 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 [22]. Par ailleurs, elle permet d'inférer des relations spatiales non-explicitement indiquées dans la description, et ainsi d'adopter un point de vue exocentré [23]. 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 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 [24, 25]. 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 [26]. 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 [27] 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 [28]. [29] 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 [30]. 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 donnée 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.

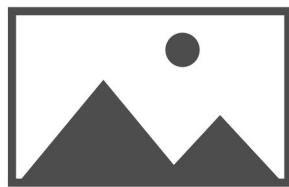


FIGURE 1.5 – Exemples de cartes tactiles imprimées sur du papier thermogonflé.

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 [31] 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 [32] 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 [33], 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.

[34] 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 [35, 36] en utilisant la base de données OpenStreetMap comme source afin de permettre la génération de carte tactile sur n’importe quel territoire.

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
[33]	Stylisation	Non	Complet	États-Unis	Rues	Embossage
[34]	Stylisation	Non	Complet	Japon	Rues	Thermogonflage
[35, 36]	Stylisation	Non	Complet	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[37]	Stylisation	Oui	Partiel	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[39]	Apprentissage profond	Non	Complet	Mondiale	Rues	Impression 3D
[40]	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.

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. [37] 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.

[38] 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. [39] 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 [40] 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 [38], et est plus abordable lorsqu'elle est complétée d'une information sonore [41]. 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 [42], 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. [43] 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 [44] 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 [42].

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 [45] 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 [42], 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 [46] modélise la précision positionnelle de bâtiments en établissant un son spécifique pour chaque valeur de cette variable. Une approche similaire de [47] 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 [48] ou encore [49], 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 [50] est une extension de TMAP [33] permettant d'interagir avec la carte pour obtenir des informations sur l'élément touché par synthèse vocale et repose sur le matériel conçu par [49]. L'émergence des écrans tactiles grand public a permis la conception d'outils plus accessibles [41] comme DERi.

1.3.4 Les dispositifs d'aide in-situ

Pour cheminer en ville, une 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 [5]. Une revue plus exhaustive des dispositifs existants est proposée par [51].

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 [52]. 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 (voir 1.6) ou de matériels spécifiques comme les Global Positioning Systems (GPSs) [53].

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 [54]. Certains utilisent ces capteurs pour localiser l'utilisateur sur la base d'une cartographie d'un lieu [55]. Les caméras embarquées peuvent également servir d'outil de positionnement à l'aide d'algorithmes de vision par ordinateur [56].



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>.

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 [57, 58]. [59] 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 [60] 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 [61] 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. [62] 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 [63] est basé sur une application mobile pour suivre virtuellement un guigade GPS et construire une carte mentale du trajet. Enfin, [64] s’inspire des jeux d’aventures textuels pour micro-ordinateurs pour construire un graphe d’exploration 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

Production		Localisation		Interaction		Référentiel		Usage		Échelle
------------	--	--------------	--	-------------	--	-------------	--	-------	--	---------

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

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

Le carrefour peut être un espace d’interaction entre piétons et véhicules. Dans le cas où il permet à un piéton de le franchir, la signalisation permet alternativement aux flux des piétons ou des voitures de le traverser en sécurité. Pour une PCDV, cette traversée peut être complexe en raison de la variabilité et l’hétérogénéité des configurations, du nombre de voies présentes, et des équipements de contrôle du trafic et d’accessibilité. Dans ce chapitre, nous présentons l’architecture du carrefour du point de vue d’une personne concernée, puis nous analysons au regard des besoins évoqués la manière dont ces données sont représentées dans la base de données OSM. Enfin, nous proposons une représentation objet de la donnée OSM que nous appliquons à une modélisation du carrefour orientée sur l’accessibilité.

2.1 La structure globale du carrefour

Un carrefour, tel que défini par le dictionnaire Larousse, est un « lieu où se croisent plusieurs rues ou plusieurs routes, généralement aménagé en vue d’éviter les risques de collision, et parfois d’améliorer le débit ». Une particularité concernant nos travaux est que le carrefour nous intéresse du point de vue du piéton, et notamment du piéton concerné par la déficience visuelle, dont les spécificités doivent être prise^{en} compte dans la définition d’un carrefour tel que nous le concevons. Lors des travaux préliminaires à ce mémoire, nous avons interrogé des personnes concernées et professionnels du Centre de Rééducation pour Déficients Visuels (CRDV) de Clermont-Ferrand pour établir cette définition. Pour ces dernières, la limite d’un carrefour correspond à l’étendue de ce qu’une personne peut entendre. Bien qu’il existe des travaux de modélisation accoustique [65] orientés notamment sur la propagation du bruit, cette approche nous semble difficile à généraliser dans un premier temps. Nous avons donc choisi de nous concentrer tout d’abord sur la structure du carrefour du point de vue du piéton, en en proposant une représentation sous forme de graphe, puis en s’intéressant aux éléments d’accessibilité spécifiques à la mobilité des PCDVs.

2.1.1 Le graphe du carrefour du point de vue d’un piéton

Pour modéliser le carrefour du point de vue d’un piéton, nous avons choisi ~~de nous~~ ~~reposer sur une approche graphique~~ afin de le définir et de le délimiter dans un réseau routier. Les définitions suivantes en définissent la structure :



FIGURE 2.1 – Ces deux trottoirs ne sont pas couvrants car ils possèdent un noeud en commun.

Définition 1 On appelle **couverture** d'un graphe $G_0 = (V_0, E_0)$ et plongé dans le plan un ensemble de sous-graphes \mathcal{G} , tels que :

- Si $G_1 = (V_1, E_1) \in \mathcal{G}$, et $G_2 = (V_2, E_2) \in \mathcal{G}$, alors $E_1 \cap E_2 = \emptyset$
- $\forall e \in E_p, \exists! G_1 = (V_1, E_1) \in \mathcal{G}$ tel que $e \in E_1$

Dans la suite, on appelle \mathcal{G}_p une couverture du graphe piéton, et \mathcal{G}_r une couverture du graphe routier.

Dans la suite, on dira que deux sous-graphes sont **connectés** s'ils partagent au moins un sommet en commun.

Définition 2 On définit un **graphe multimodal** comme un graphe $G = (V, E)$ plongé dans le plan et muni d'une couverture $\{G_r = (V_r, E_r), G_p = (V_p, E_p)\}$ composée d'un **graphe routier** G_r et d'un **graphe piéton** G_p .

Dans la suite, on note $G = (V, E)$ un graphe multimodal sur lequel on définit les autres ensembles et propriétés.

Remarque : l'intersection entre V_r et V_p peut ne pas être vide.

Définition 3 Soient $G_1 = (V_1, E_1)$ et $G_2 = (V_2, E_2)$ deux sous-graphes de $G = (V, E)$.

On appelle **fonction d'association** $f : E_1 \rightarrow E_2$ toute fonction qui à chaque arête de G_1 associe une arête de G_2 .

Définition 4 Alors on appelle **trottoir** tout $G_t = (V_t, E_t) \in \mathcal{G}_p$ sous-graphe du graphe piéton muni d'une fonction d'association $f_t : G_t \rightarrow G_r$ projetant les arêtes de G_t dans le graphe routier. Cette fonction f_t est appelée **fonction d'adjacence** du trottoir G_t .

On note \mathcal{G}_t l'ensemble des trottoirs.

Définition 5 Étant donné une couverture \mathcal{G}_p d'un graphe piéton G_p , un ensemble de fonctions d'adjacence est dit **un ensemble de trottoirs couvrants** s'il n'existe pas de sommet $v \in G_p$ appartenant à plus d'un trottoir.

Exemple : couverture d'un graphhe piéton qui n'est pas un ensemble de trottoirs couvrants (voir Figure 2.1).

Définition 6 On appelle **chemin** un graphe $G_{ch} = (V_{ch}, E_{ch})$ tel que $V_{ch} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ et $E_{ch} = \{\{p_1, p_2\}, \{p_2, p_3\}, \dots, \{p_{n-1}, p_n\}\}$.

Définition 7 Un **passage piéton** $G_{pp} = (V_{pp}, E_{pp}) \in \mathcal{G}_p$ est un chemin (p_1, p_2, \dots, p_n) tel que :

- p_2, p_3, \dots, p_{n-1} sont inclus dans le graphe routier



- (a) Couverture routière incomplète : deux branches ne peuvent pas être connectées.
(b) Une couverture de quartier comprend plusieurs carrefours.

FIGURE 2.2 – On remarque la différence entre une couverture routière incomplète et une couverture routière complète.

- p_2, p_3, \dots, p_{n-1} n'appartiennent pas à un trottoir
- p_1 et p_n appartiennent chacun à un trottoir

Définition 8 Une couverture \mathcal{G}_r d'un réseau routier est dite **couverture routière complète** si et seulement si elle est composée d'une union disjointe de **coeurs de carrefours** $\mathcal{G}_c \subset \mathcal{G}_r$ et de **branches** $\mathcal{G}_b \subset \mathcal{G}_r$ tels que :

- $\mathcal{G}_c \neq \emptyset$
- Deux coeurs de carrefour ne sont pas connectés
- Chaque branche est connectée à un ou deux coeurs de carrefour
- Un cœur de carrefour est au minimum connecté à deux branches distinctes

Remarque : un cœur de carrefour ne peut pas être un chemin.

Exemples :

- Une couverture routière qui n'est pas complète (voir Figure 2.2a)
- Une couverture routière à plusieurs carrefours, dites de quartier (voire Figure 2.2)

Définition 9 Une couverture \mathcal{G}_p d'un réseau piéton est dite **couverture piétonne complète** si et seulement si elle est composée d'une union disjointe de trottoirs, de passages piétons, et d'**îlots** $\mathcal{G}_i \in \mathcal{G}_p$ tel qu'un îlot n'est connecté qu'à des passages piéton.

Définition 10 Une **traversée** $G_t = (V_t, E_t) \in \mathcal{G}_p$ est un chemin (p_1, p_2, \dots, p_n) tel que :

- p_1 et p_n appartiennent à un trottoir
- p_2, p_3, \dots, p_{n-1} n'appartiennent pas à un trottoir
- $\forall e \in E_t, e$ appartient soit à un passage piéton, soit à un îlot

Définition 11 Un **carrefour** est un graphe multimodal composé d'une couverture routière complète ne contenant qu'un seul cœur de carrefour, d'une couverture piétonne complète et d'un ensemble de traversées (voir Figure 2.3).



FIGURE 2.3 – Le graphe multimodal d'un carrefour.

Image	Description
	Une BEV permet de détecter au pied ou à la canne la présence d'un passage piéton. On remarque sur l'image ci-contre qu'elle est abîmée, ce qui peut altérer sa détectabilité.
	Les poteaux parfois présents aux abords des passages piétons permettent à l'inster des BEV de signaler leur présence. Leur sommet est contrasté avec le corps pour permettre à une personne malvoyante de les distinguer.
	Les feux de signalisation piéton peuvent être équipés d'une balise sonore. Le message joué par celle-ci varie, mais peut indiquer le nom de la rue traversée lorsque le feu est rouge. Un son de cloche est émis lorsque le feu est vert.

TABLE 2.1 – Équipements d'accessibilité au sein du carrefour.

2.1.2 Les repères au sein du carrefour

Pour effectuer une traversée du carrefour en sécurité, il existe un certain nombre d'équipements d'accessibilité pouvant être mobilisés par une PCDV. Ces équipements ont des rôles divers, comme permettre de repérer une traversée, ou d'y accéder par un nivellation adapté (dans le cas d'une Personne à mobilité réduite (PMR) par exemple). Pour répondre aux besoins des différents usagers, ces équipements font appel à des sens différents : l'ouïe pour les signaux sonores, le toucher pour les éléments tactiles, mais également la vue pour les potelets contrastés ou les passages piétons matérialisés par de la peinture au sol qui peut être mobilisée par les PCDVs présentant un résidu visuel. Plusieurs équipements pouvant être rencontrés sur un carrefour sont présentés au sein de la table 2.1.

Au-delà des équipements d'accessibilité, le cycle des feux est également utile aux PCDVs pour analyser la circulation et traverser en sécurité [6]. Le cycle des feux correspond aux états successifs de chaque feu et permet de savoir quelles voies sont actuellement passantes. Il existe des modèles permettant la représentation de cette donnée, notamment au sein des outils de simulation de traffic routier [66]. Cependant, il n'existe actuellement aucun territoire la rendant accessible au sein d'une source de données ouverte.

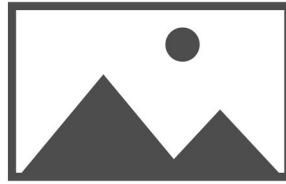


FIGURE 2.4 – Les différents objets d'OSM peuvent chacun contenir des attributs.

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

OSM est une base de données géographique libre sous licence ODbL. Une de ses spécificités concerne son ouverture aux contributions après inscription, la carte étant intégralement réalisée par les utilisateurs. Nous verrons dans cette partie que, si elle n'est pas particulièrement spécialisée pour la modélisation des carrefours, ses capacités de représentation et la couverture spatiale et sémantique actuelle de certaines données la rendent intéressante pour notre cas d'utilisation.

2.2.1 Une forte capacité de représentation

Plus qu'une base de données géographique, OSM est une base de données topologique pouvant être représentée sous la forme d'un graphe non-connexe. 3 types d'objets peuvent être manipulés pour cartographier une entité : les points (node), les lignes (way), et les relations, chacun pouvant contenir une sémantique sous la forme de clés et de valeurs associées (voir Figure 2.4)

OpenStreetMap est très souple concernant la représentation de l'accessibilité piétonne, et permet de cartographier finement de nombreux aménagements. Il est ainsi possible de représenter un graphe piéton contenant sous forme linéaire les trottoirs et les passages piétons. Au-delà de la géométrie, la sémantique associée permet de compléter les informations liées à l'accessibilité. Sur un passage piéton, cela peut permettre d'indiquer la présence de BEVs (tactile_paving), d'un feu piéton (traffic_signals pouvant être associée à plusieurs clés), et de préciser si ce dernier est sonorisé (traffic_signals:sound). On peut également faire figurer la bordure du trottoir (kerb) et son élévation par rapport à la chaussée.

Au-delà de l'accessibilité de la voirie, la sémantique permet également de préciser l'accessibilité d'autres équipements. Cela vaut pour les bâtiments et commerces pour lesquels il est possible d'évaluer l'accessibilité d'une entrée (entrance) en fauteuil roulant (wheelchair) ainsi que la largeur de passage, mais également les aménagements tels que les arrêts de bus (highway=bus_stop) qui peuvent être abrités (shelter) ou disposer d'un banc (bench).

Les clés et valeurs que nous évoquons se reposent sur la documentation établie par la communauté au sein du wiki d'OSM¹. Si certaines clés et valeurs se sont imposées par l'usage (dit "de fait"²), la pratique usuelle pour faire évoluer la sémantique consiste à soumettre au vote de la communauté via le wiki une proposition de clés et valeurs sup-

1. <https://wiki.openstreetmap.org/>

2. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Category:Key_descriptions_with_status_%22de_facto%22

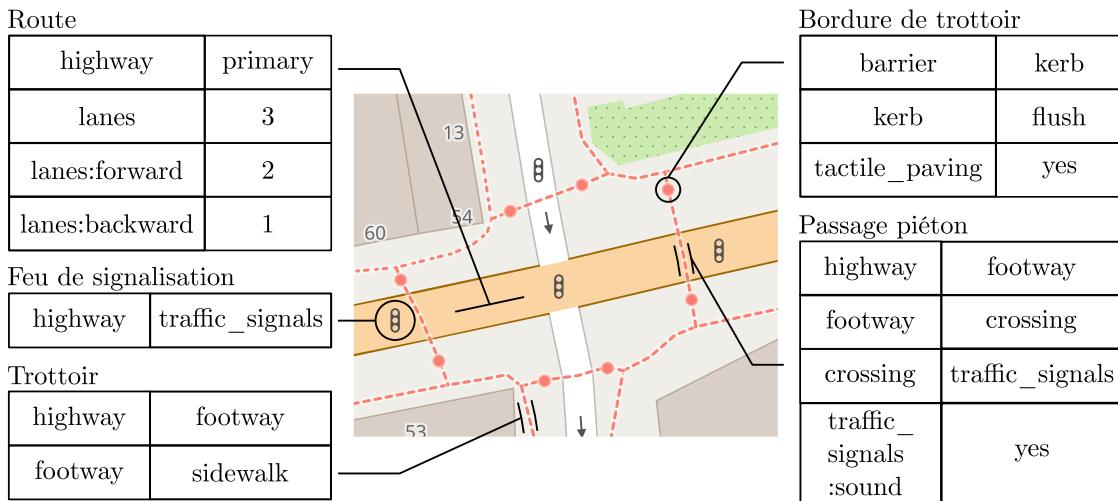


FIGURE 2.5 – Exemple de carrefour et des attributs associés dans OpenStreetMap. Outre le graphe piéton, des indications sur l'équipement d'accessibilité ou la largeur des voies (lanes) sont également présentes. Source : Contributteurs OpenStreetMap.

plémentaires pour représenter une nouvelle entité ou modifier un standard actuellement en vigueur. Nous pouvons illustrer cette pratique avec une donnée utile pour un piéton déficient visuel : le cycle des feux (évoqué en partie 2.1.2). S'il n'est pas possible avec la sémantique actuelle de représenter le cycle des feux sur OSM, un utilisateur propose en 2017 d'introduire une relation `type=timing`³ pour modéliser cette information. Elle n'est pas, à l'heure actuelle, validée par la communauté car potentiellement inapplicables sur plusieurs territoires.

La représentation des carrefours sur OpenStreetMap est en partie possible, mais ne correspond pas entièrement à notre besoin. Il existe la clé `junction`, qui permet de pointer un carrefour voire de le délimiter (Figure 2.6). Elle permet, au-delà de la valeur `yes` qui signifie que l'objet concerné est un carrefour, d'indiquer certains types de carrefour, en particulier les ronds-points avec la valeur `roundabout`⁴. Cependant, la sémantique actuelle ne permet pas de modéliser les branches associées au carrefour. Par ailleurs, la plupart des carrefours ne sont pas représentés de cette manière. Un exemple de cartographie de carrefour dans OSM est présenté en figure 2.5.

2.2.2 Des variations dans les modélisations

Pour un même objet, plusieurs modélisations sont possibles voire peuvent coexister au sein d'OSM. Cela peut provenir d'une évolution de la sémantique (le modèle de description des transports en communs a évolué dans le temps), mais aussi de la possibilité d'avoir plusieurs niveaux de détails. Ce second cas s'illustre particulièrement bien sur l'accessibilité piétonne.

Les trottoirs peuvent être représentés de trois manières différentes : sous une forme sémantique sur le filaire automobile, sous la forme d'un filaire séparé de la route, mais également sous la forme d'un polygone. Cette modélisation guidera également celle des

3. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Proposal:Traffic_Signal_Timings

4. <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:junction>

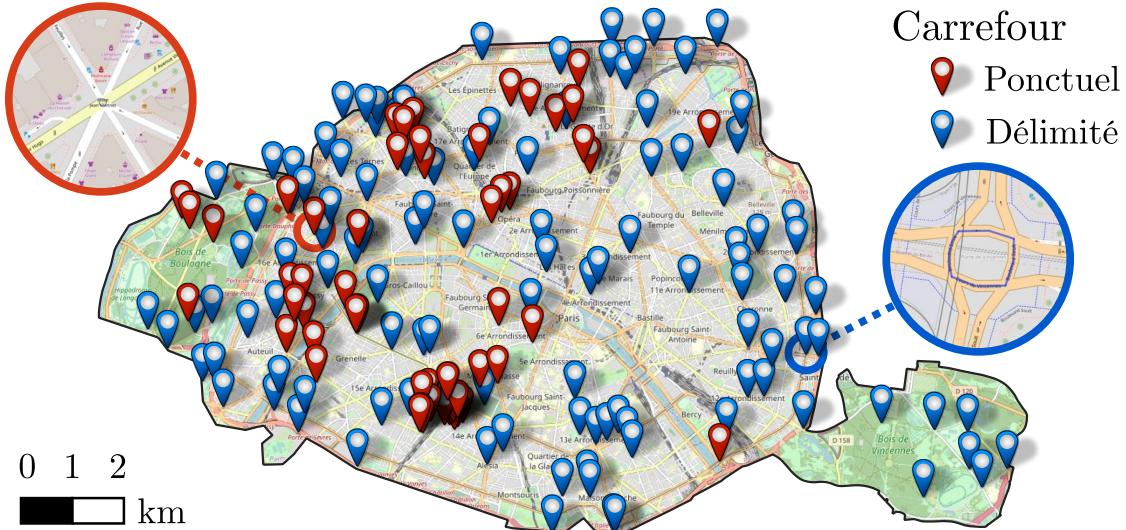


FIGURE 2.6 – À Paris, bien qu'il y ait beaucoup d'objets portant la clé junction, la majorité des carrefours ne sont pas représentés sous cette forme. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

passages piétons qui pourront être représentés comme un nœud sur le filaire automobile, potentiellement complété d'un filaire. Ces différentes modélisations sont illustrées en figure 2.7.

Par ailleurs, les pratiques sont localement variées. Le journal d'un utilisateur d'OpenStreetMap⁵ présente l'historique de cartographie des trottoirs jusqu'à 2021 en comparant l'évolution des trottoirs cartographiés en sémantique sur la route et les trottoirs filaires sur la Grande-Bretagne et la Pologne (voir figure 2.8). On note dans tous les cas une évolution significative de l'intérêt pour cette thématique au fil du temps.

2.3 Un modèle de carrefour

Pour utiliser la donnée OSM dans un contexte spécifique, il est préconisé de la manipuler à l'aide d'un modèle de donnée spécialisé intermédiaire [67]. Nous proposons dans un premier temps une modélisation objet générique de la donnée OSM, que nous appliquons dans un second temps à la modélisation du carrefour. Enfin, nous présentons les méthodes permettant d'instancier ce modèle depuis OpenStreetMap.

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

Comme présenté dans la partie 2.2, les objets représentés au sein d'OSM sont définis par un ensemble de clés et de valeurs. Ainsi, pour manipuler chaque objet, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des clés et valeurs qui vont le définir. En ce sens, il est plus commode de manipuler un modèle intermédiaire pour lequel cet ensemble est prédéfini. Cette problématique a déjà été abordée au sein des ontologies réalisées autour d'OSM[68, 69] ou des travaux qui s'appuient sur ces données [67]. Cependant, une particularité des

5. <https://www.openstreetmap.org/user/Hungerburg/diary/395540>

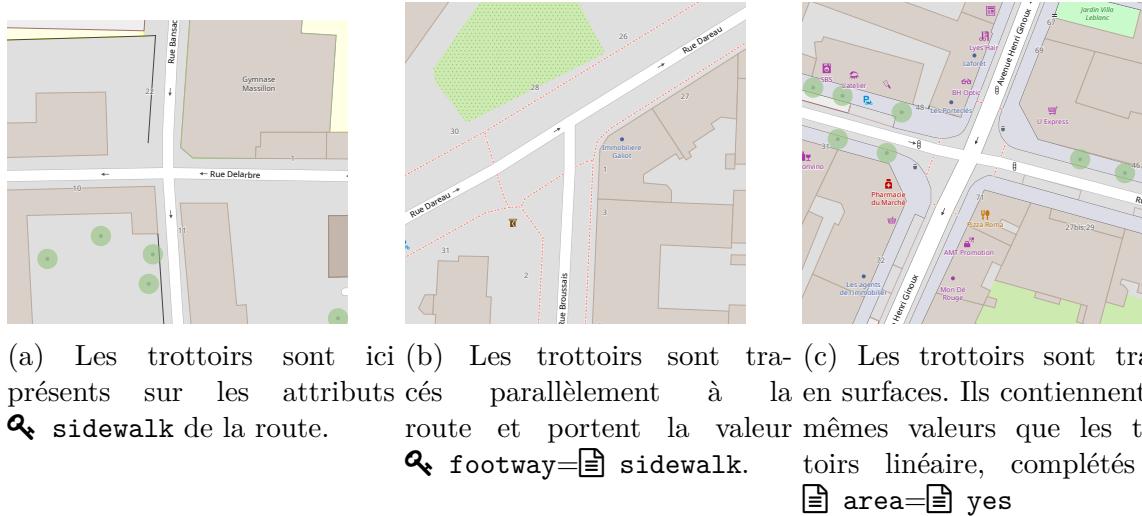


FIGURE 2.7 – Illustration des différentes modélisations de trottoirs possibles sur OSM.
Source : Contributeurs OpenStreetMap.

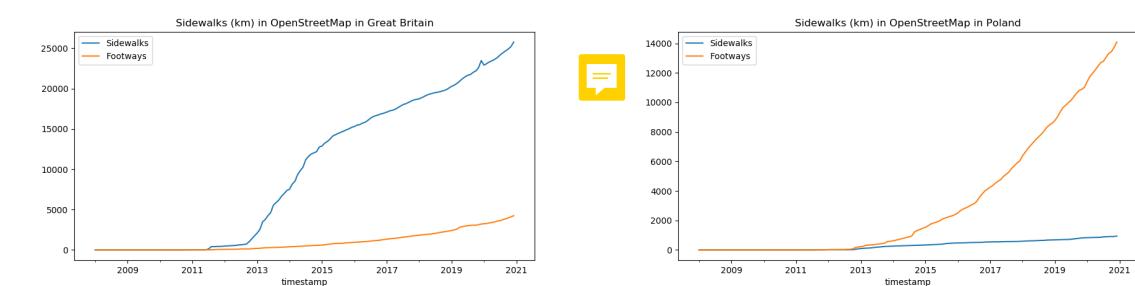


FIGURE 2.8 – Les pratiques de cartographies peuvent être localisées sur OSM. En Pologne, le filaire piéton s'est majoritairement développé au contraire de la Grande-Bretagne où il reste majoritairement présent en sémantique du réseau routier. Source : <https://www.openstreetmap.org/user/Hungerburg/diary/395540>.

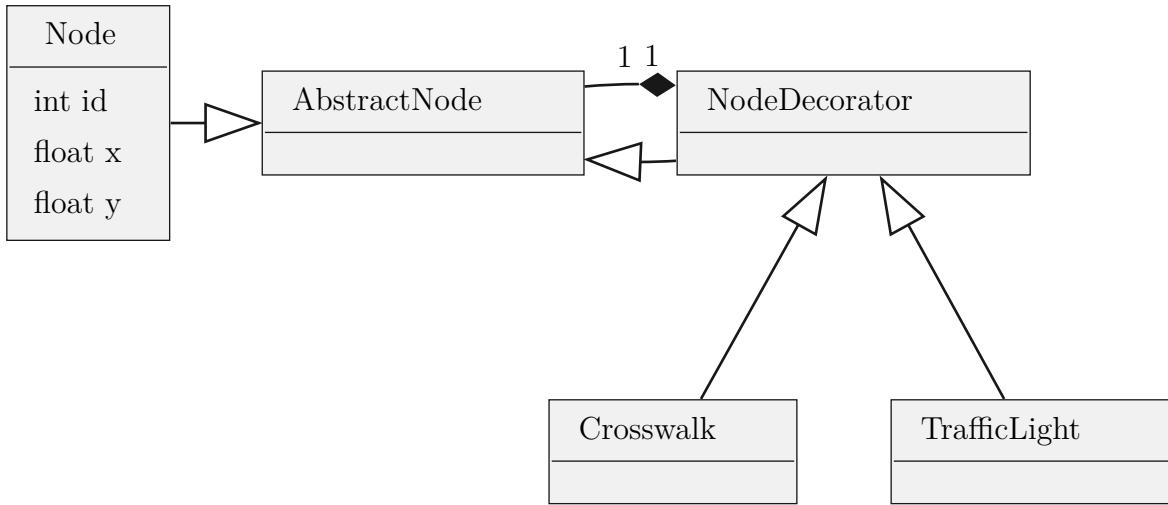


FIGURE 2.9 – Modèle OSM-Objet. Les classes Crosswalk et TrafficLight sont présentes pour illustrer l'utilisation.

capacités sémantique d'OpenStreetMap est qu'il est possible que la somme des clés et des valeurs d'une entité corresponde à plusieurs objets dans la vie réelle. Un exemple typique concerne les passages piétons représentés par un nœud et dont la sémantique contient souvent à la fois celle associée au passage piéton, ainsi que celle associée au feu de circulation. Pour gérer cette particularité, nous proposons un modèle de données orienté objet appelé OSM-Objet.

OSM-Objet se repose sur le patron de conception du décorateur [70]. Le décorateur permet d'ajouter dynamiquement des fonctionnalités à un objet sans passer par une sous-classe, et en conservant la même interface pour le manipuler. Dans notre cas, comme l'illustre la figure 2.9, nous pouvons manipuler un nœud, qui peut être simultanément un passage piéton et un feu de signalisation.

2.3.2 Application à la modélisation du carrefour

Pour modéliser le carrefour, nous proposons CrModel, le modèle de données en figure 2.10. Il représente un graphe du carrefour, dont la classe Node figure les noeuds et la classe Way figure les tronçons. Nous avons architecturé les noeuds autour d'OSM-Objet. Chaque branche (Branch) est identifiée par un numéro et contient tous les tronçons qui en font partie. Une branche peut également contenir une traversée (Crossing). Nous avons également introduit certains comportements spécifiques :

- Les différentes voies d'une route sont identifiées par des attributs sur OSM. Nous avons donc ajouté la classe Lane pour représenter cette information dans un paradigme objet.
- Les trottoirs (Sidewalk) et les îlots (Island) sont également des classes indépendantes et non de la sémantique sur les tronçons. Chaque tronçon peut contenir deux PedestrianNode, permettant d'indiquer quel trottoir ou îlot est à sa droite ou à sa gauche.
- Nous voulons pouvoir indiquer pour chaque branche si et comment elle se traverse. Pour cela, nous avons introduit la classe Crossing qui consiste en une séquence de passages piétons entre deux trottoirs. Les passages piétons eux-même sont compo-

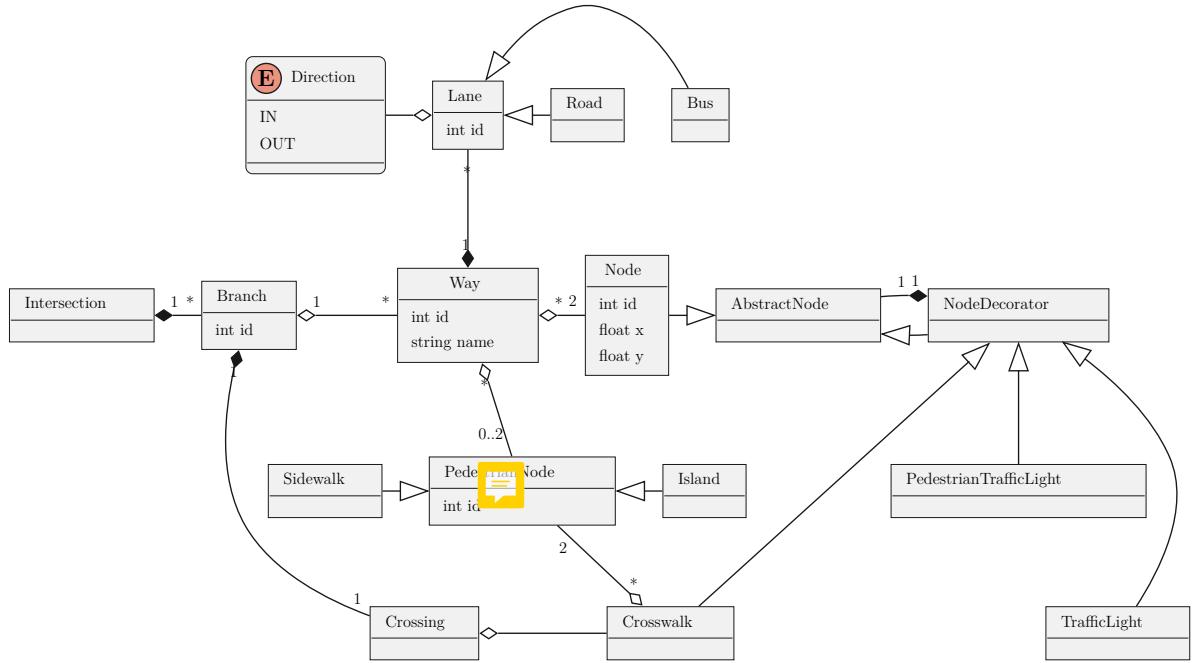


FIGURE 2.10 – Modèle CrModel architecturé autour d’OSM-Objet.

sés de deux *PedestrianNode* qui indiquent où se situe le passage piéton (entre un trottoir et îlot par exemple).

Pour instancier CrModel, il est nécessaire de disposer d’un graphe routier dont la sémantique identifie les branches, la position des trottoirs et des îlots, et les passages piétons. Les parties suivantes de ce chapitre détaillent :

- le processus de segmentation des carrefours au sein d’un graphe routier issu d’OSM,
- le processus qui, à partir de la segmentation, dérive les informations piétonnes du carrefour : trottoirs, îlots, traversées.

2.4 Segmenter un carrefour dans le graphe d’OSM

Du point de vue d’un piéton, la bordure entre le cœur de carrefour et les branches (voir définition 8) sera généralement située au niveau des passages piétons pour chaque branche du carrefour. Si une branche n’a pas de passage piéton, cette séparation sera située là où les véhicules s’arrêtent (feu de circulation, panneau stop, etc.) comme illustré à la figure 2.11a. En cas d’absence de toute signalisation, la limite sera placée aussi près que possible pour éviter d’étendre sa zone dans la branche adjacente, comme illustré à la figure 2.11b.

Comme évoqué en partie 2.2.2 l’infrastructure piétonne est aujourd’hui encore rarement modélisée séparément de la route. Par conséquent, nous proposons dans la suite de cette partie de considérer uniquement la donnée contenue par les noeuds et arêtes du réseau routier. Nous supposons que les informations suivantes (reconstruites ou directement disponibles) sont accessibles sur le réseau routier :

- La largeur de la route, directement accessible (width) ou estimée en fonction du type de route (highway) et du nombre de voies (lanes),



(a) Un carrefour dont les bordures sont définies par deux passages piétons (lignes vertes) et un par deux passages piétons (lignes vertes) et une feu de signalisation (ligne rouge).
(b) Un carrefour dont les bordures sont définies par deux passages piétons (lignes vertes) et un par deux passages piétons (lignes vertes) et une branche sans marquage (ligne rouge).

FIGURE 2.11 – Les bordures des carrefours sont situées au niveau des infrastructures, si elles existent. Fond de plan : Géoportail © IGN. Source : [3].

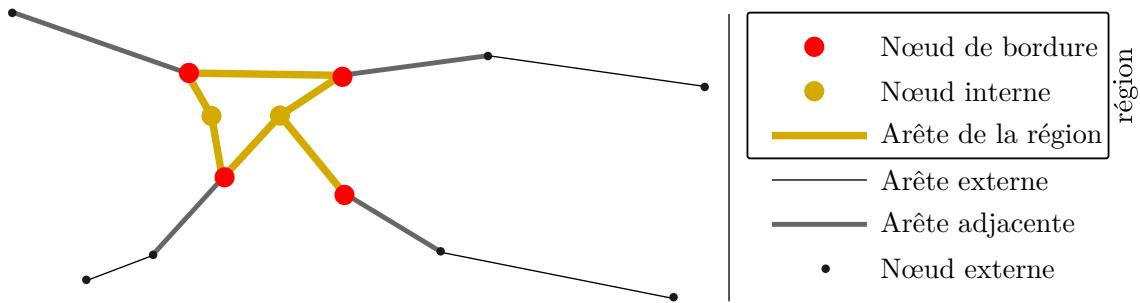


FIGURE 2.12 – Exemple de région définie dans le graphe. Source : [3].

- le type de route, si elle correspond à un carrefour (`junction` ou `highway =` `*_link`),
- le nom de la route (`name`),
- le type du nœud s'il décrit un élément de l'infrastructure (clé `highway`) : passage piéton (`crossing`), feu de circulation (`traffic_signal`), panneau stop (`stop`) ou cédez-le-passage (`give_way`).

Cette partie est issue de travaux réalisés en collaboration avec Jean-Marie Favreau et publiés dans [3] et [4].

2.4.1 Étapes d'une segmentation multi-échelle de carrefour

On considère un graphe routier $G_r = (V_r, E_r)$ dont les nœuds et les arêtes contiennent des informations sémantiques sous la forme de clés-valeurs. Nous définissons une segmentation du graphe routier en identifiant pour chaque région de la segmentation un ensemble non-vide de nœuds et un ensemble possiblement vide d'arêtes, avec la contrainte suivante : si une arête appartient à une région, ses deux nœuds lui appartiennent également. Pour chaque région, nous identifions deux types de nœuds : les **nœuds internes** (uniquement connectés aux arêtes appartenant à la région), et les **nœuds de bordure** (connectés à au moins une arête appartenant à la région, et une arête n'appartenant pas à la région) (voir figure 2.12). Les **arêtes adjacentes** d'une région sont identifiées comme les arêtes qui n'appartiennent pas à la région, mais dont une des extrémités en fait partie.

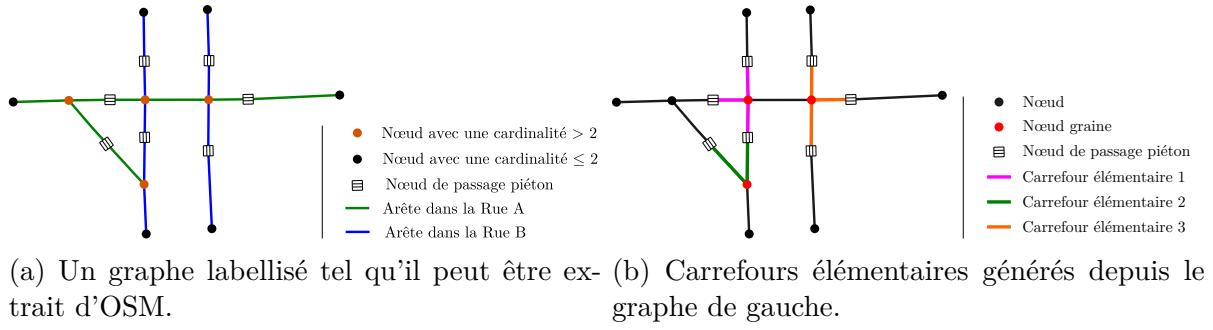


FIGURE 2.13 – Résultat de la segmentation d'un carrefour élémentaire. Source : [3].

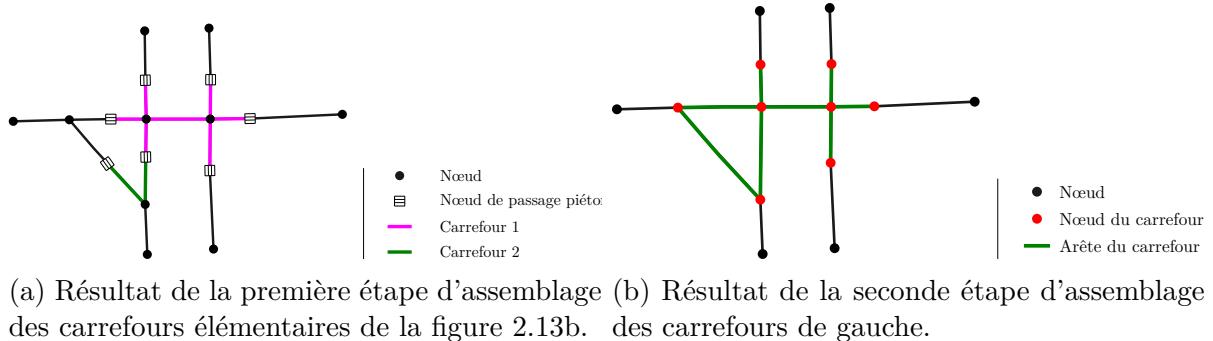


FIGURE 2.14 – Résultat de l'assemblage des carrefours élémentaires. Source : [3].

2.4.1.1 Carrefour élémentaire

La première étape de la détection des carrefours que nous proposons consiste à évaluer pour chaque noeud la probabilité qu'il s'agisse d'un noeud interne ou d'un noeud de bordure d'un carrefour. Cette première identification nous permet de caractériser :

- Les passages piétons comme probables noeuds de bordure d'un carrefour
- Les noeuds représentant les entités de contrôle du traffic (feu de signalisation, panneaux stop et cédez-le-passage) comme possibles noeuds de bordure d'un carrefour
- Les noeuds avec une cardinalité supérieure à deux, et dont les arêtes adjacentes ont des noms de rue distincts, comme probablement noeuds internes d'un carrefour, et considérés comme noeuds graine dans les étapes suivantes de l'algorithme

2.4.1.2 Approche multi-échelle

Cette première identification (voir figure 2.13a) permet de construire les carrefours élémentaires, en utilisant la sémantique de la voie pour guider la décision d'étendre et consolider la segmentation de chaque noeud graine (voir figure 2.13b). En revanche, elle ne correspond pas réellement à l'intuition d'un piéton. En effet, elle produit plusieurs petites régions souvent proches les unes des autres. Cependant, nous pouvons identifier ces dernières comme des sous-parties d'un carrefour plus complexe. En utilisant la sémantique, la géométrie et la topologie des arêtes adjacentes à chaque carrefour, nous proposons un algorithme pour assembler les carrefours élémentaires en carrefours fonctionnels.

La première étape d'assemblage consiste à identifier des couples de carrefours connectés par un chemin court, et qui ont des arêtes adjacentes orthogonales à ce chemin et portant le même nom de rue (voir figure 2.14a). La seconde étape consiste ensuite à identifier les ensembles de carrefours connectés par un cycle court, et de les agrégner en carrefours

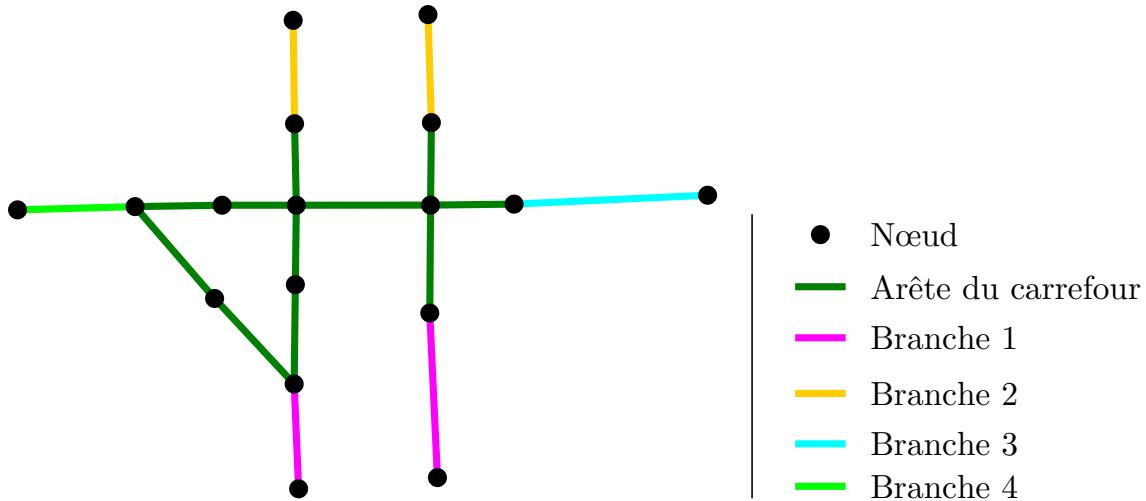


FIGURE 2.15 – Segmentation des branches depuis le carrefour fonctionnel de la figure 2.14b et utilisant les noms de rue donnés en figure 2.13a. Source : [3].

fonctionnels. Cela nous permet de prendre en compte les carrefours complexes avec des voies de tourne-à-droite, ou des carrefours comportant plusieurs routes internes (voir figure 2.14b).

Dans ces deux étapes d'assemblage, la notion de "court" est construite proportionnellement à la largeur de la voie, et en considérant la sémantique des arêtes appartenant au carrefour. Par exemple, si une arête est labellisée comme partie d'un carrefour, alors sa longueur est diminuée. Le chemin résultant est comparé à la largeur de la voie (voir 4.2).

2.4.1.3 Segmentation des branches

Enfin, si la chaussée est complexe, il peut arriver que les branches d'un carrefour soit composées de plusieurs arêtes, par exemple en présence d'un séparateur de voies ou d'un îlot. La dernière étape de la segmentation consiste à regrouper les arêtes par branches en utilisant leurs informations géométriques et sémantiques (voir figure 2.15).

2.4.2 Détails du processus de segmentation

Le processus décrit dans la suite repose sur trois paramètres permettant à l'utilisateur de piloter la segmentation :

- C_0 pour ajuster l'échelle du carrefour élémentaire. Appliqué comme coefficient à la largeur de la voie pour moduler la distance maximale pour laquelle un nœud est considéré comme un nœud de bordure d'un carrefour donné.
- C_1 pour ajuster l'échelle de la première fusion des carrefours. Appliqué comme coefficient à la largeur de la voie pour moduler la distance maximale de fusion de deux carrefours élémentaires.
- C_2 pour ajuster l'échelle de l'assemblage final des carrefours complexes. Appliqué comme coefficient à la largeur de la voie pour moduler la longueur maximale du lien qui connecte deux carrefours fonctionnels.

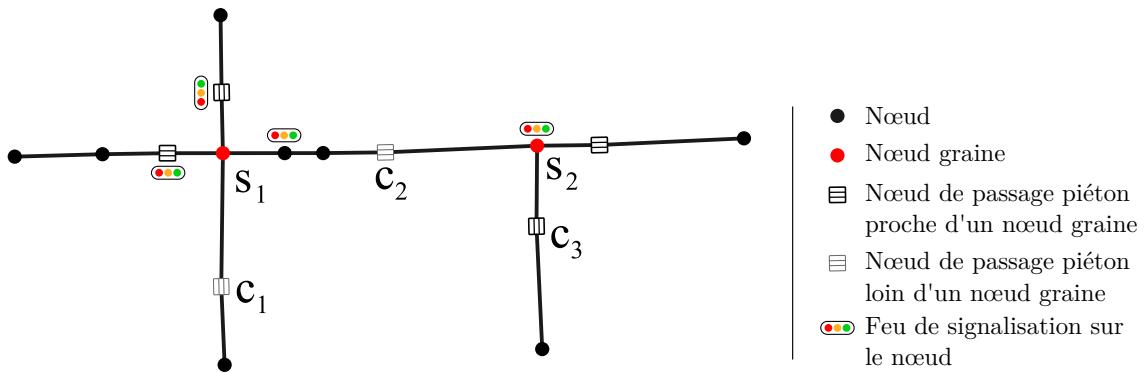


FIGURE 2.16 – Deux nœuds graines où des régions élémentaires seront calculées. Source : [3].

2.4.2.1 Probabilité d'appartenance à un carrefour ou sa bordure

Pour modéliser la probabilité qu'un nœud ou une arête appartiennent à un carrefour et la probabilité qu'un nœud appartienne à une bordure de carrefour, nous proposons d'utiliser une représentation floue : *oui fort*, *oui modéré*, *oui faible*, *incertain*, *non faible*, *non modéré*, *non fort*. Une série de règles est alors utilisée pour transformer la sémantique d'OSM en incertitude :

- les arêtes labellisées comme carrefour appartiennent à un carrefour (*oui fort*),
- les nœuds labellisés comme passages piétons appartiennent à la bordure d'un carrefour (*oui fort*),
- les nœuds qui correspondent à un feu de signalisation, un panneau stop ou un cédez-le-passage sont probablement à la bordure d'un carrefour (*oui modéré*),
- les nœuds avec une cardinalité supérieure ou égale à quatre sont des nœuds internes à un carrefour (*oui fort*),
- les nœuds avec une cardinalité égale à trois et dont les noms des voies adjacentes ne sont pas uniques appartiennent probablement à un carrefour (*oui modéré*).

Ces règles permettent d'associer une probabilité d'appartenance à certains nœuds, et donc d'initier et guider la segmentation des intersections en considérant une projection synthétique de la sémantique initiale dans un espace simplifié.

2.4.2.2 Segmentation en carrefours élémentaires

Chaque nœud appartenant à un carrefour (*faible oui* ou supérieur), ou faisant partie d'une arête appartenant à un carrefour (*faible oui* ou supérieur) est considéré comme un *nœud graine*. À partir de chacun de ces nœuds, on propage la construction d'une région le long des chemins adjacents, en intégrant un chemin uniquement s'il atteint un nœud identifié comme possible bordure du carrefour, et à une distance raisonnable, en fonction de la largeur des voies autour du nœud initial.

Si un possible nœud de bordure identifié n'est pas fortement considéré comme faisant partie de la bordure (par exemple si c'est un feu de signalisation), la recherche est poursuivie le long du chemin, au cas où un nœud de bordure fortement considéré soit présent un peu plus loin.

La figure 2.16 illustre ce processus avec deux nœuds nœuds graines, avec un ensemble

de configurations représentatives :

- Le niveau de détails peut varier dans la modélisation : un carrefour (s_2) a une description synthétique de l'infrastructure de signalisation, tandis que l'autre carrefour (s_1) en propose une description plus précise, chaque feu de signalisation étant localisé sur une route.
- Certains passages piétons (c_1 et c_2) sont éloignés des carrefours et pourraient ne pas être considérés comme des nœuds de bordure.

La proposition que nous avons faite pour la sélection des graines permet aux deux niveaux de détail (détailé avec s_1 et peu détaillé avec s_2) d'être pris en compte, étant donné que seule la topologie du graphe et le nom des voies est considérée.

La transformation de la sémantique d'OSM en degrés d'appartenance à la bordure nous permet de finement contrôler l'algorithme pour générer des carrefours élémentaires sans se préoccuper de la sémantique des nœuds. Ainsi, le carrefour construit depuis la graine s_1 (figure 2.16) sera composé de trois chemins : deux pour les passages piétons associés aux feux de signalisation, et un pour le feu de signalisation sans passage piétons.

Un possible nœud de bordure b est considéré comme un nœud de bordure d'un carrefour initié par un nœud graine s si il satisfait les conditions données par la formule 2.1, où $\text{length}(\cdot, \cdot)$ est la longueur du chemin entre b et s , \mathcal{C}_0 est un paramètre de notre méthode, E_s est un ensemble d'arêtes qui contient s , et w_e est une estimation de la largeur des voies.

$$\text{length}(b, s) \leq \mathcal{C}_0 \max_{e \in E_s} w_e \quad (2.1)$$

En pratique, nous estimons la largeur des voies en utilisant une largeur typique pour chaque type de route (3 mètres pour une voie dans un tronçon contenant `highway=primary`, 2.75 m pour une voie dans un tronçon contenant `highway=secondary`, etc.). Nous avons également noté que $\mathcal{C}_0 = 2$ donne de bons résultats dans les centres historiques européens.

Dans la sélection proposée dans la figure 2.16, c_1 et c_2 sont considérés comme ne faisant pas partie des carrefours, mais c_3 fait partie du carrefour partant de s_2 .

Si la rue qui connecte s_1 à s_2 avait été moins large, l'algorithme n'aurait pas considéré c_3 comme un des passages piétons proches. De la même manière, si cette rue avait été plus large, c_1 aurait rejoint la liste des passages piétons proches du carrefour.

2.4.2.3 Fusionner les carrefours élémentaires en utilisant la géométrie et la sémantique

Les carrefours élémentaires dans le même voisinage sont alors fusionnés en considérant la géométrie de leurs arêtes adjacentes.

Nous comparons pour chaque paire de carrefours élémentaires i_1 et i_2 la distance euclidienne $|s(i_1), s(i_2)$ entre les graines $s(\cdot)$ avec une mesure de proximité donné dans la formule (2.2), où \mathcal{C}_1 est un paramètre de notre méthode, $w(i)$ est la largeur maximum des rues dans i , et $\alpha_{i_1, i_2} \in \{1, \frac{1}{2}\}$ en fonction de la présence d'un possible nœud de bordure dans le chemin qui connecte i_1 et i_2 .

$$p_{i_1, i_2} = \mathcal{C}_1 \alpha_{i_1, i_2} \max\{w(i_1), w(i_2)\} \quad (2.2)$$

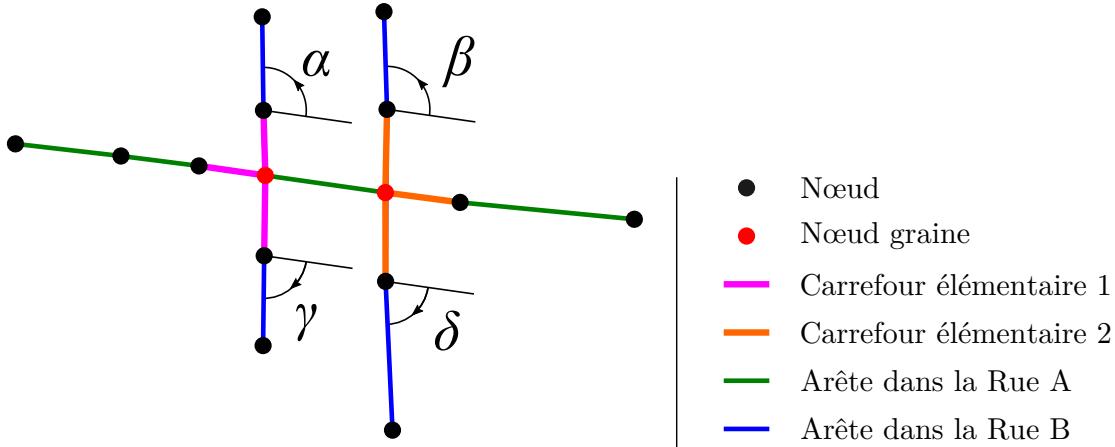


FIGURE 2.17 – Deux carrefours élémentaires dont la proximité entre les nœuds graines nécessite la prise en compte de la configuration des arêtes adjacentes. Ces deux carrefours élémentaires ont deux paires d’arêtes adjacentes ($\{\alpha, \beta\}$ et $\{\gamma, \delta\}$) avec le même nom, des directions consistantes, et des directions significativement différentes au regard du segment défini par les deux graines initiales. Source : [3].

La paire de carrefours est alors considérée en fonction de cette proximité :

- si $|s(i_1), s(i_2)| > p_{i_1, i_2}$, les deux carrefours ne sont pas voisins,
- si $|s(i_1), s(i_2)| \leq \frac{1}{2}p_{i_1, i_2}$, les deux carrefours élémentaires sont considérés comme faisant partie du même carrefour fonctionnel,
- entre ces deux valeurs, on considère les angles et noms des arêtes adjacentes pour décider si les deux carrefours élémentaires font partie du même carrefour fonctionnel. Pour chaque paire de carrefours voisins, on identifie les paires d’arêtes adjacentes portant le même nom, qui sont orientées dans une direction similaire (avec un angle relatif inférieur à 90°), et dont l’orientation relative au segment défini par les graines des deux carrefours est significativement différent (d’un angle supérieur à 45°). Si une telle paire d’arêtes existe, alors les deux carrefours élémentaires font parties du même carrefour fonctionnel. La figure 2.17 illustre ce calcul en montrant les deux carrefours élémentaires avec deux paires d’arêtes adjacentes, chacune dans la configuration attendue pour fusionner les carrefours.

En pratique, nous avons noté que $C_1 = 2$ donne de bons résultats dans les centre historiques européens.

Une nouvelle région est ainsi créé en assemblant tous les nœuds et arêtes qui constituent les carrefours initiaux, et en ajoutant les nœuds et arêtes qui constituent le chemin qui connecte les carrefours fusionnés.

2.4.2.4 Assembler les carrefours

Une fois que tous les carrefours ont été identifiés et fusionnés par sémantique, ils sont assemblés en carrefours fonctionnels.

La première étape consiste à identifier toutes les composantes connexes du complémentaire des carrefours précédemment calculés. Ces composantes associées constituent les régions des possibles liens entre les différents carrefours. Dans chacune de ces composantes associées, nous identifions l’ensemble des chemins de liaisons, par exemple les chemins qui

connectent deux carrefours distincts.

Pour piloter la taille des carrefours générés, on définit pour un chemin de liaison k une longueur adaptée définie par la formule 2.3, en fonction de la probabilité qu'il appartienne à un carrefour. Pour cela, on pondère la longueur $\text{length}(k)$ du lien, où E_k est l'ensemble des arêtes de k , n_k est le nombre de nœuds dans k dont la cardinalité est supérieure à trois, et $p_e = \frac{1}{2}$ si e est labellisé comme faisant partie d'un carrefour, et 1 sinon.

$$\text{length}'(k) = \frac{\sum_{e \in E_k} \text{length}(e)p_e}{\log e^{n_k+1}} \quad (2.3)$$

Ensuite, on cherche l'ensemble des cycles qui contiennent une alternance de carrefours et de chemins de liaison, en conservant dans le processus une boucle l si elle satisfait les deux conditions suivantes, pilotées par un paramètre \mathcal{C}_2 . D'abord, on sélectionne uniquement les chemins de liaison courts qui vérifie la formule ref eq:0004, où w_k est la largeur maximum des voies dans k .

$$\text{length}'(k) \leq w_k \mathcal{C}_2 \quad (2.4)$$

À partir de ces chemins de liaison, on sélectionne uniquement les cycles courts, en utilisant \mathcal{C}_2 comme paramètre de notre méthode, comme décrit par la formule 2.5, où L_l est l'ensemble des chemins de liaison au sein de l .

$$\sum_{k \in L_l} \text{length}'(k) \leq \max_{i \in I_l} \{w_i\} \pi \mathcal{C}_2 \quad (2.5)$$

En pratique, nous avons noté que $\mathcal{C}_2 = 4$ donne de bons résultats dans les centres historiques européens, quand le paramètre pourrait être augmenté pour capturer des carrefours plus importants, en particulier autour des voies express et des autoroutes.

Les carrefours fonctionnels sont alors le résultat de l'assemblage des carrefours et des chemins de liaison de ces cycles.

L'approche que nous proposons a l'avantage de gérer à la fois les carrefours complexes contenant des voies de tourne-à-droite (voir figure 2.14b), les carrefours complexes qui contiennent des polylignes décrivant les chemins internes du carrefour, mais aussi les ronds-points (voir figure 2.18).

2.4.2.5 Identification des branches

Enfin, pour chaque carrefour assemblé de cette manière, on identifie ses branches en construisant une liste de toutes ses arêtes externes connectées à un nœud appartenant à une arête du carrefour. Ces arêtes sont alors assemblées en les groupant ensemble si elles portent le même nom et sont orientés dans une direction similaire (avec un angle relatif inférieur à 90°), comme illustré en figure 2.19.

2.4.3 Calcul des informations piétonnes

À partir d'un carrefour segmenté, il est maintenant possible de déduire des informations piétonnes utiles pour l'instanciation de CrModel, notamment les trottoirs, les îlots, et les traversées de branches. Ces étapes sont détaillées dans les sous-parties suivantes.

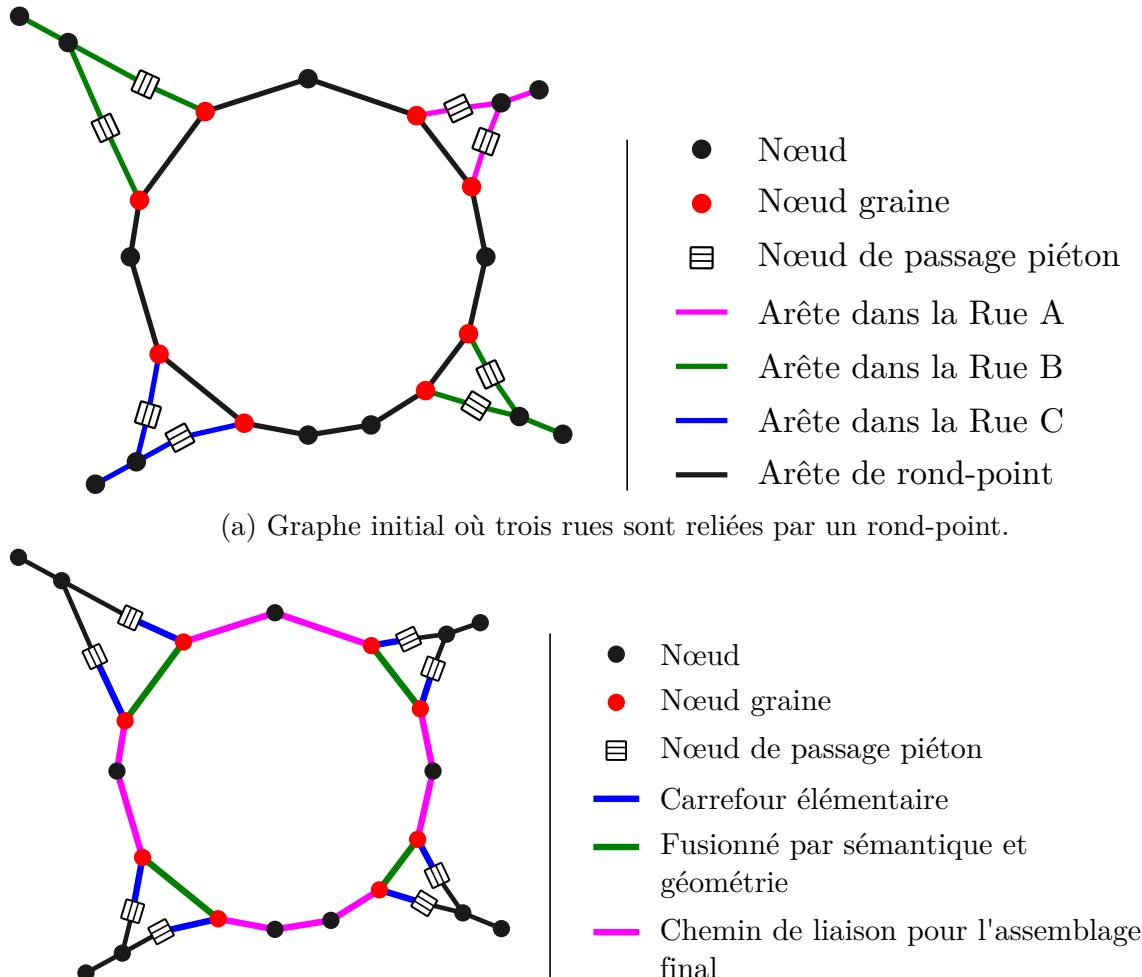


FIGURE 2.18 – Illustration du processus dans un rond-point. Source : [3].

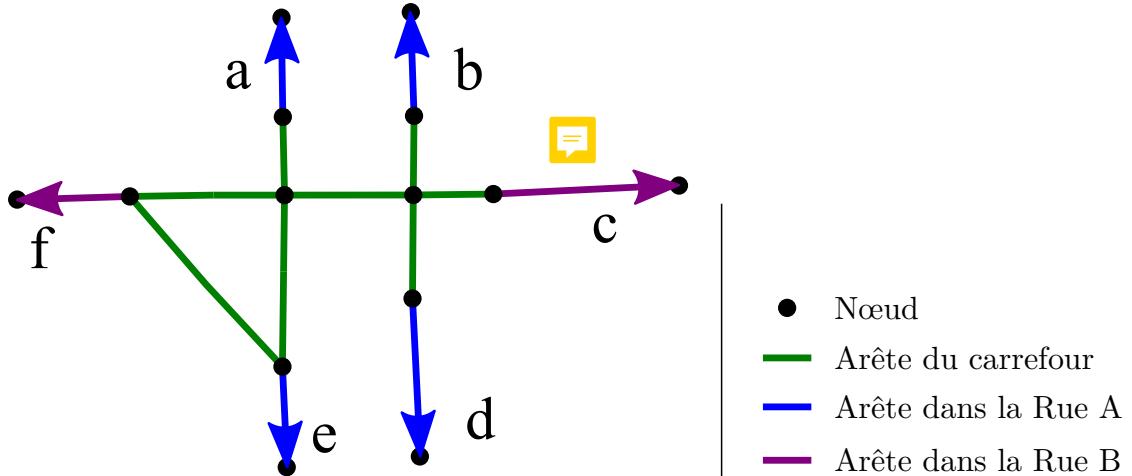


FIGURE 2.19 – La sémantique de chaque arête adjacente de ce carrefour contient le nom de la rue. On peut alors les grouper en utilisant ces noms et une direction consistante pour calculer les branches correspondantes : {a, b}, {c}, {d, e}, {f}. Source : [3].

2.4.3.1 Aggrégation des trottoirs

Dans OSM, les trottoirs identifiés sous forme de sémantique sur le réseau routier ne sont pas agrégés en une entité unique : chaque tronçon de route indique s'il présente ou non un trottoir à sa droite ou à sa gauche. Si l'on veut considérer une entité trottoir complète, il est nécessaire d'agréger les tronçons correspondants et déterminer de quel côté le trottoir est situé.

La génération est réalisée de la manière suivante : d'abord, les branches issues de la segmentation (voir figure 2.15) ne sont pas ordonnées, donc nous les ordonnons dans le sens des aiguilles d'une montre (voir figure 2.20.2). Pour chaque branche du carrefour, une par une dans le sens des aiguilles d'une montre, on part du nœud situé à l'extrémité de l'arête la plus à droite et on parcourt le graphe en tournant toujours à gauche jusqu'à atteindre une seconde extrémité (voir figure 2.20.3). Le chemin traversé correspond alors à un trottoir (voir figure 2.20.4). Si l'arête est traversée dans sa direction, le trottoir est situé à sa gauche, sinon il est situé à sa droite. Si aucune sémantique n'indique l'absence de trottoir, on considère qu'il est présent. Nous avons fait ce choix car la majorité des villes ont des trottoirs, et la donnée OSM n'est pas encore suffisamment renseignée sur la sémantique associée.

2.4.3.2 Génération des îlots

En dehors de la clé `crossing:island` qui indique la présence d'un îlot au milieu d'une traversée mais dont la présence est marginale, les îlots sont absents de la sémantique d'OSM. En revanche, l'usage montre que les îlots sont représentés par les faces du graphe routier et peuvent être déduits de cette manière [71]. Pour cela, il faut tout d'abord fermer les branches composées de plusieurs arêtes (voir figure 2.21.1) pour obtenir des faces et détecter l'intégralité des îlots (voir figure 2.21.2).

2.4.3.3 Génération des traversées

Après avoir généré les trottoirs et les îlots, une traversée correspond à une séquence de passages piétons permettant de traverser d'un trottoir à un autre en passant uniquement

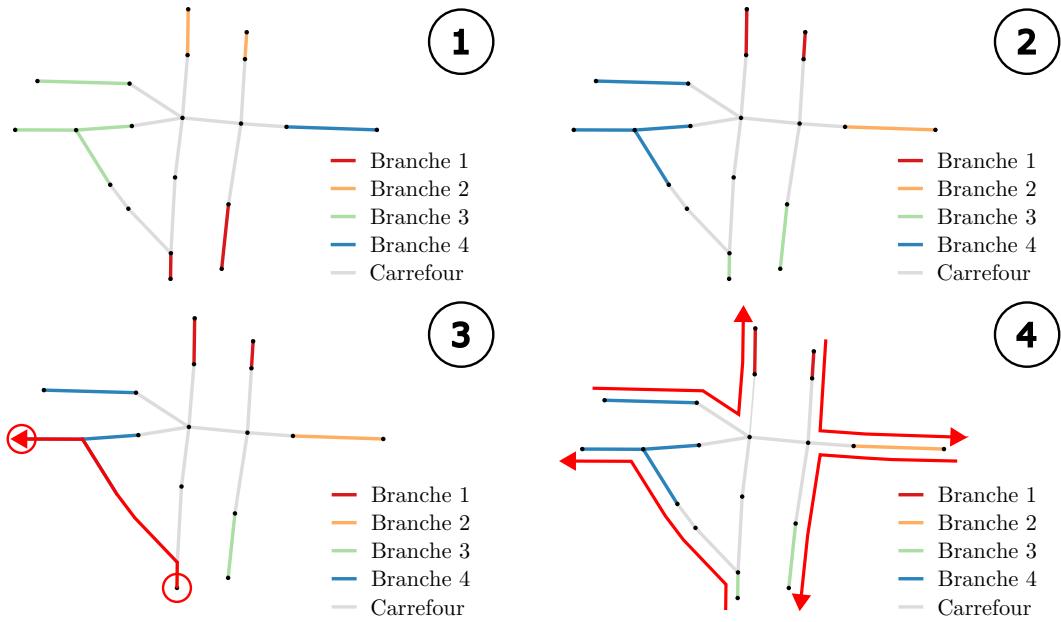


FIGURE 2.20 – Étapes de génération des trottoirs. Source : [4].

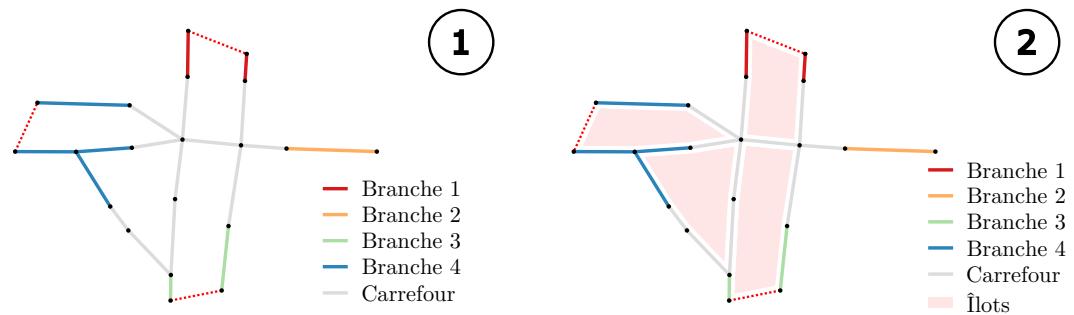


FIGURE 2.21 – Étapes de génération des îlots. Source : [4].

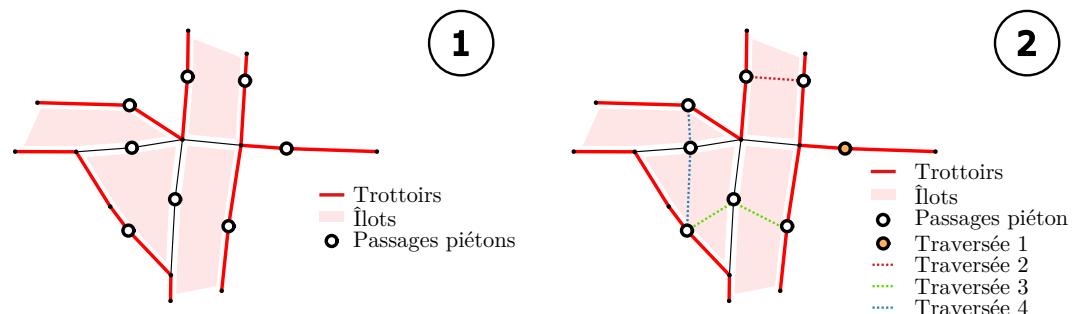


FIGURE 2.22 – Étapes de génération des traversées. Source : [4].

par des îlots. On peut alors générer ces traversées en utilisant un graphe dual où les trottoirs et les îlots deviennent des nœuds, et les passages piétons des arêtes. Calculer les traversées revient alors à calculer le chemin le plus court entre deux trottoirs sans passer par un autre trottoir (voir figure 2.22).

2.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié la structure globale du carrefour du point de vue d'un piéton déficient visuel, en nous intéressant dans un premier temps à sa construction topologique, et à son infrastructure d'accessibilité. Les données d'accessibilités existantes étant éparsees et hétérogènes, nous avons choisi de travailler sur OSM en analysant la manière dont les carrefours et l'accessibilité y sont cartographiés.

Nous avons proposé un modèle de données permettant de représenter la sémantique d'OSM dans un formalisme objet. Nous l'avons appliqué à un modèle de données permettant de représenter un carrefour du point de vue du piéton, en modélisant notamment les traversées. Nous détaillons par la suite les processus permettant d'instancier ce modèle depuis OSM en segmentant son graphe routier pour y détecter les carrefours et leurs attributs. L'implémentation et l'évaluation des processus présentés sont détaillées respectivement en chapitres 4 et 5.

Le modèle présenté peut avoir de nombreux usages, de la généralisation  du carrefour à sa représentation sous une autre forme. Le chapitre suivant se concentre sur ce deuxième cas, en s'intéressant à la description textuelle des carrefours.

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] Jean-Marie Favreau and Jérémie Kalsron. What are intersections for pedestrian users ? *AGILE : GIScience Series*, 3 :1–15, June 2022. ISSN 2700-8150. doi : 10.5194/agile-giss-3-4-2022. URL <https://agile-giss.copernicus.org/articles/3/4/2022/>.
- [4] Jérémie Kalsron, Jean-Marie Favreau, and Guillaume Touya. CrossroadsDescriber – Automatic Textual Description of OpenStreetMap Intersections. 3 :40. doi : 10.5194/agile-giss-3-40-2022. URL <https://uca.hal.science/hal-03694759>.
- [5] Caroline Pigeon, Nicolas Baltenneck, Anna Rita Galiano, and Gérard Uzan. Étude homère - Étude nationale sur la déficience visuelle. Technical report, 2023.
- [6] Agathe Ratelle and Julie-Anne Couturier. *Manuel d'intervention en orientation et mobilité*. PU Montréal, January 2019. ISBN 978-2-7606-3905-8.
- [7] 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>.
- [8] 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/jevp.1998.0098. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494498900986>.
- [9] Nicholas Giudice and R.G. Long. Establishing and Maintaining Orientation for Orientation and Mobility. pages 45–62. January 2010.
- [10] Lisa Denis, Jérémie Kalsron, and Jean-Marie Favreau. Représenter l'espace urbain pour les personnes concernées par le handicap visuel. 2023.
- [11] Christina Aschan-Leygonie, Claire Cunty, and Paule-Annick Davoine. *Les systèmes d'information géographique*. Armand Colin, October 2019. ISBN 978-2-200-61718-9.

- [12] 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.
- [13] 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>.
- [14] 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>.
- [15] 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>.
- [16] 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>.
- [17] 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>.
- [18] 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.
- [19] 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>.
- [20] 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>.

- [21] 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/>.
- [22] 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>.
- [23] 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.
- [24] 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>.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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>.
- [29] 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.

- [30] 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>.
- [31] 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>.
- [32] 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>.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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>.
- [38] 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>.

- [39] 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>.
- [40] 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.
- [41] 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>.
- [42] 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>.
- [43] J. Douglas Porteous and Jane F. Mastin. Soundscape. *Journal of Architectural and Planning Research*, 2(3) :169–186, 1985. ISSN 0738-0895.
- [44] Didier Josselin, Dorian Roussel, Said Boularouk, Abdelberry Saidi, Driss Matrouf, Olivier Bonin, and Eitan Altman. Sonorous cartography for sighted and blind people. June 2016. URL <https://hal.science/hal-01338081>.
- [45] 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>.
- [46] 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>.
- [47] 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.
- [48] 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.

- [49] 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>.
- [50] 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>.
- [51] 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>.
- [52] 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>.
- [53] 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>.
- [54] R Damaschini, Richard Legras, R Leroux, and René Farcy. Electronic Travel Aid for blind people. Lille, France, 2005.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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>.
- [58] 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.

- [59] 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>.
- [60] 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>.
- [61] 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 Fédératif de Recherche sur les Aides Techniques pour personnes Handicapées (IFRATH), IFRATH. URL <https://hal.science/hal-02926462>.
- [62] Cathy Thomé. Faciliter et sécuriser les déplacements extérieurs pour les personnes en situation de handicap visuel via un entraînement auditif, September 2021.
- [63] 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>.
- [64] 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/>.
- [65] R. Bullen and F. Fricke. Sound propagation at a street intersection in an urban environment. 54(1) :123–129. ISSN 0022-460X. doi : 10.1016/0022-460X(77)90411-4. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022460X77904114>.
- [66] Pablo Alvarez Lopez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun-Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner, and Evamarie Wiessner. Microscopic Traffic Simulation using SUMO. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 2575–2582. doi : 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [67] Guillaume Touya and Jean-François Girres. Generalising Unusual Map Themes from OpenStreetMap. In *17th ICA Workshop on Map Generalisation and Multiple Representation*, Vienna, Austria, September 2014. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02280105>.

- [68] Mihai Codescu, Gregor Horsinka, Oliver Kutz, Till Mossakowski, and Rafaela Rau. OSMonto - An Ontology of OpenStreetMap Tags.
- [69] Anthony Hombiat. Of4osm : un méta-modèle pour structurer la folksonomie d'openstreetmap en une nouvelle ontologie. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01683028>.
- [70] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, and John Vlissides. *Design Patterns : Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison Wesley, 1er édition edition. ISBN 978-0-201-63361-0.
- [71] Stelios Vitalis, Anna Labetski, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. From road centrelines to carriageways—A reconstruction algorithm. 17(2) :e0262801. ISSN 1932-6203. doi : 10.1371/journal.pone.0262801. URL <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0262801>.