

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	19
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	22
1.3.4 Les dispositifs d'aide in-situ	23
1.3.5 La réalité virtuelle et les maquettes interactives	24
1.4 Synthèse et conclusion	24
2 La modélisation du carrefour	27
2.1 La structure globale du carrefour	27
2.1.1 Le graphe du carrefour du point de vue d'un piéton	27
2.1.2 Les repères au sein du carrefour	29
2.2 La modélisation d'un carrefour au sein d'OpenStreetMap	31
2.2.1 Une forte capacité de représentation	31
2.2.2 Des variations dans les modélisations	32
2.3 Un modèle de carrefour	33
2.3.1 OSM-Objet : une modélisation objet de la donnée OpenStreetMap .	33
2.3.2 Application à la modélisation du carrefour	34
2.4 Segmenter un carrefour dans le graphe d'OpenStreetMap (OSM)	35
2.4.1 Étapes d'une segmentation multi-échelle de carrefour	36
2.4.2 Détails du processus de segmentation	39
2.4.3 Calcul des informations piétonnes	43
2.5 Conclusion du chapitre	45
3 La description du carrefour	47
3.1 Des données géographiques au texte	47
3.1.1 Définition de la description	48
3.1.2 Spécification du système de conception de description	48
3.2 Cas d'utilisation : la description des carrefours	51
3.2.1 La réalisation d'une description textuelle	51

3.2.2	La réalisation d'une description dans la carte	52
3.2.3	La réalisation d'une description sous forme de graphe	52
3.3	Conclusion du chapitre	52
4	Expérimentations	55
4.1	Du graphe OpenStreetMap à la description exocentrale	55
4.1.1	Conception du canevas modulaire	55
4.1.2	Intégration du canevas dans un Système d'Information Géographique (SIG)	58
4.1.3	Utilisation des outils pour générer une description	62
4.1.4	Des interfaces pour accéder aux descriptions	62
4.2	Des descriptions textuelles intégrées à une carte tactile	64
4.2.1	Preuve de concept 1 : réaliser une carte audiotactile	64
4.2.2	Preuve de concept 2 : interactions à partir de données graphe . . .	67
4.3	Le carrefour dont vous êtes le héros : naviguer dans une description égocentrale	70
4.3.1	Texte souhaité et forme des données	71
4.3.2	Obtention du graphe et génération des informations textuelles . . .	72
4.3.3	Implémentation au sein d'une application web	72
4.4	Conclusion du chapitre	73
5	Évaluation	75
5.1	Évaluation des implémentations	75
5.1.1	Évaluation de crseg	75
5.1.2	Évaluation de crmodel	79
5.2	Évaluation du canevas de description	81
5.2.1	Enquête auprès des professionnels	81
5.2.2	Intégration des modifications au canevas	83
5.3	Conclusion du chapitre	86
6	Conclusions et perspectives	87
6.1	Discussion générale	87
6.2	Perspectives	88
6.2.1	Vers des données plus précises	88
6.2.2	Aller au-delà du carrefour	89
6.2.3	Les apports de l'intelligence artificielle	91
A	Réponses au questionnaire envoyé aux Instructeur pour l'Autonomie des personnes déficientes visuelles (IA)	93

Table des figures

1.1	Carte tactile produite avec des aimants	16
1.2	Représentation en couche des données géographiques	17
1.3	Bonnes pratiques d'implantation des pavages tactiles	18
1.4	Une description de carrefour issue de la littérature	20
1.5	Différents types de cartes en relief	21
1.6	Application mobile de guidage	24
2.1	Ensemble de trottoirs non-couvrants	28
2.2	Couverture d'un quartier	29
2.3	Graphe multimodal d'un carrefour	30
2.4	Anatomie d'un carrefour dans OpenStreetMap	32
2.5	Les carrefours dans OpenStreetMap à Paris	33
2.6	Différentes modélisation de trottoirs sur OpenStreetMap	34
2.7	Variation des pratiques de contribution sur OpenStreetMap	34
2.8	Modèle OSM-Objet.	35
2.9	Modèle CrModel.	36
2.10	Définition des bordures d'un carrefour	37
2.11	Régions du graphe de carrefour	37
2.12	Segmentation d'un carrefour élémentaire	38
2.13	Assemblage de carrefours élémentaires	38
2.14	Segmentation des branches d'un carrefour	39
2.15	Noeuds graines utilisés pour la segmentation de carrefour	40
2.16	Assemblage de deux carrefours élémentaires	42
2.17	Processus de segmentation d'un rond-point	44
2.18	Identification des branches d'un carrefour	45
2.19	Génération de trottoirs	46
2.20	Génération d'îlots	46
2.21	Génération de traversées	46
3.1	Exemple de canevas de description	50
3.2	Chaîne de traitement de réalisation de description	51
3.3	Graphe de texte d'un tronçon de rue	53
4.1	Exemple de description de carrefour	56
4.2	Données produites par crseg	59
4.3	Données produites par crmodel	59
4.4	Chaîne de traitement de données sous QGIS	60
4.5	Fenêtre QGIS de conception de description	61
4.6	Fenêtre QGIS de l'assemblage des descriptions	62

4.7	Modèle graphique QGIS pour générer une description	63
4.8	Étapes d'exécution de la chaîne de description par l'utilisateur	63
4.9	Interfaces simplifiées de génération de description	64
4.10	Exemple de fichier DERi	65
4.11	Chaîne de traitement SIG pour générer un DERi	66
4.12	Exemples de cartes audiotactiles	67
4.13	Exemple de fichier DERi 2	68
4.14	Exemple de graphe de description de branche	69
4.15	Carte tactile A5 et graphe de description de branche	70
4.16	Exemple de description égocentrale	71
4.17	Démonstrateur de navigation virtuelle dans un carrefour	73
5.1	Interface de l'outil d'évaluation	76
5.2	Interface pour explorer les évaluations réalisées	77
5.3	Régions sélectionnées pour l'évaluation statistique	78
5.4	Répartition des carrefours considérés lors du processus d'évaluation	79
5.5	Types de problèmes rencontrés au cours du processus d'évaluation	80
5.6	Carrefours choisis pour l'enquête auprès des instructeurs	82
5.7	Reformulation simple dans la chaîne de description	84
5.8	Reformulation complexe dans la chaîne de description	84
5.9	Formulation d'une nouvelle information sans ajout de données dans la chaîne de description	85
5.10	Formulation d'une nouvelle information avec ajout de donnée dans la chaîne de description	86
6.1	Graphe de cheminement du géostandard	89
6.2	Labellisation des branches d'un carrefour	90
6.3	Graphe de quartier	90
6.4	Une voiture dans un carrefour	91
6.5	Mise en forme textuelle avec GPT-4	91

Liste des tableaux

1.1	Résumé de l'état de l'art sur la génération de cartes en relief	22
2.1	Équipements d'accessibilité d'un carrefour	30
4.1	Schéma tabulaire de la description générale	56
4.2	Schéma tabulaire de la description des branches	57
4.3	Schéma tabulaire de la description des traversées	57
4.4	Schéma tabulaire du plan de la description	62
4.5	Schéma tabulaire pour la génération d'une description égocentré	72
5.1	Complexité des carrefours générés dans chaque région	76
5.2	Complexité des carrefours choisis au hasard	77
5.3	Description du jeu de données d'évaluation	77
5.4	Qualité de la description par type de données	80
5.5	Relation entre les problèmes rencontrés et les données OpenStreetMap . .	81

Glossaire

AFIADV Association Francophone des Instructeurs pour l'Autonomie des personnes Déficientes Visuelles.

AILDV Association des Instructeurs de Locomotion pour personnes Déficientes Visuelles.

AVJADV Association des Instructeurs pour l'Autonomie dans la Vie Journalière des personnes Aveugles ou Déficientes Visuelles.

BEV Bandes d'Éveil de Vigilance.

CEREMA Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.

CNIG Conseil National de l'Information Géolocalisée.

CRDV Centre de Rééducation pour Déficients Visuels.

DERi Document En Relief Interactif.

GNSS Global Navigation Satellite Systems.

GPS Global Positioning System.

GTFS General Transit Feed Specification.

IA Instructeur pour l'Autonomie des personnes déficientes visuelles.

IAVJ Instructeur en Autonomie de la Vie Journalière.

IGN Institut National de l'Information Géographique et Forestière.

IGV Information Géographique Volontaire.

IL Instructeur de Locomotion.

INJA Institut National des Jeunes Aveugles.

IRIT Institut de Recherche en Informatique de Toulouse.

LIMOS Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes.

LOM Loi d'Orientation des Mobilités.

NeTEx Network Timetable Exchange.

OSM OpenStreetMap.

PCDV Personne Concernée par la Déficience Visuelle.

PMR Personne à mobilité réduite.

SGBDR Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles.

SIG Système d'Information Géographique.

Introduction

La déficience visuelle

La déficience visuelle correspond à la perte de tout ou partie de la vue. 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 IA, 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'IA 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.

Le projet ACTIVmap

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 IAs. 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 Personne Concernée par la Déficience Visuelles (PCDVs) 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.

Organisation du manuscrit

Le premier chapitre consacré à l'état de l'art abordera la manière dont les PCDVs se repèrent dans l'espace urbain, en s'intéressant aux pratiques et dispositifs existants. Nous

y définirons ce qu'est une donnée d'accessibilité, en examinant les bases existantes. Puis nous aborderons 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, nous introduirons les contributions de cette thèse.

Le second chapitre s'intéresse à la modélisation d'un carrefour urbain. Au sein de celui-ci, nous détaillons dans un premier temps une représentation graphe de la structure globale d'un carrefour. Celle-ci est abordée du point de vue d'un piéton tout en intégrant des éléments spécifiques à son accessibilité par les PCDVs. Nous explorons ensuite les capacités d'OSM pour représenter un carrefour en mobilisant les contraintes spécifiées précédemment. En s'appuyant sur celles-ci, nous proposons des algorithmes permettant de segmenter un carrefour depuis le graphe d'OSM, et de l'instancier en un modèle objet facilitant sa manipulation.

Le troisième chapitre présente différentes modalités de description de données géographiques. Nous y présentons dans un premier temps un cadre général permettant la description textuelle de toute donnée géographique au sein d'un SIG. Puis nous présentons un cas d'usage de ce cadre appliqué à la description de carrefours. Nous déclinons cette approche en l'appliquant à plusieurs paradigmes de description.

Le quatrième chapitre présente les expérimentations réalisées pour mettre en œuvre les méthodes décrites dans les chapitres précédents. Nous y détaillons les implémentations des outils de segmentation et de modélisation de carrefours. Puis nous présentons un flux de travail intégré dans un SIG pour la génération automatique d'audiodescriptions de carrefours. Ce flux est appliqué à plusieurs paradigmes de description, figées et interactives, ainsi qu'à la contribution à la conception de cartes audiotactiles dans le cadre de preuves de concepts du projet ACTIVmap.

Le cinquième chapitre se concentre sur l'évaluation des travaux réalisés. Dans un premier temps, nous présentons une évaluation des outils implementés pour segmenter et modéliser les carrefours depuis OSM. Puis nous présentons une enquête à destination des IA les invitant à modifier les audiodescriptions générées par nos outils pour qualifier des types de modifications à apporter aux descriptions. Enfin, nous mobilisons ces qualifications pour évaluer la possibilité de leur implémentation dans la chaîne de description.

Enfin, dans le chapitre de conclusion, nous réalisons une synthèse des travaux et contributions réalisés dans le cadre de cette thèse. Puis nous évoquons les perspectives de recherche et les travaux futurs qui pourraient être menés pour améliorer les méthodes et outils développés, avec un focus particulier sur la description au-delà des carrefours, et sur les apports possibles de l'intelligence artificielle.

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 [Pig23]. 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 [RC19]. Par ailleurs, il existe des cannes blanches électroniques, équipées de capteurs pouvant détecter des obstacles à distance (voir partie 1.3.4). Ces dernières sont cependant moins utilisées que leur variante traditionnelle [Pig23].

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 (voir partie 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 [Bra08].

En cognition spatiale, une carte mentale correspond à un modèle conceptuel d'un espace et des objets qui le composent [Jac98]. 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 [GL10], 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) [DKF23]. 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 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, le manuel d'orientation et mobilité proposé par RATELLE et COUTURIER [RC19] est une référence actuelle sur les pratiques de la nouvelle génération d'instructeur en France.

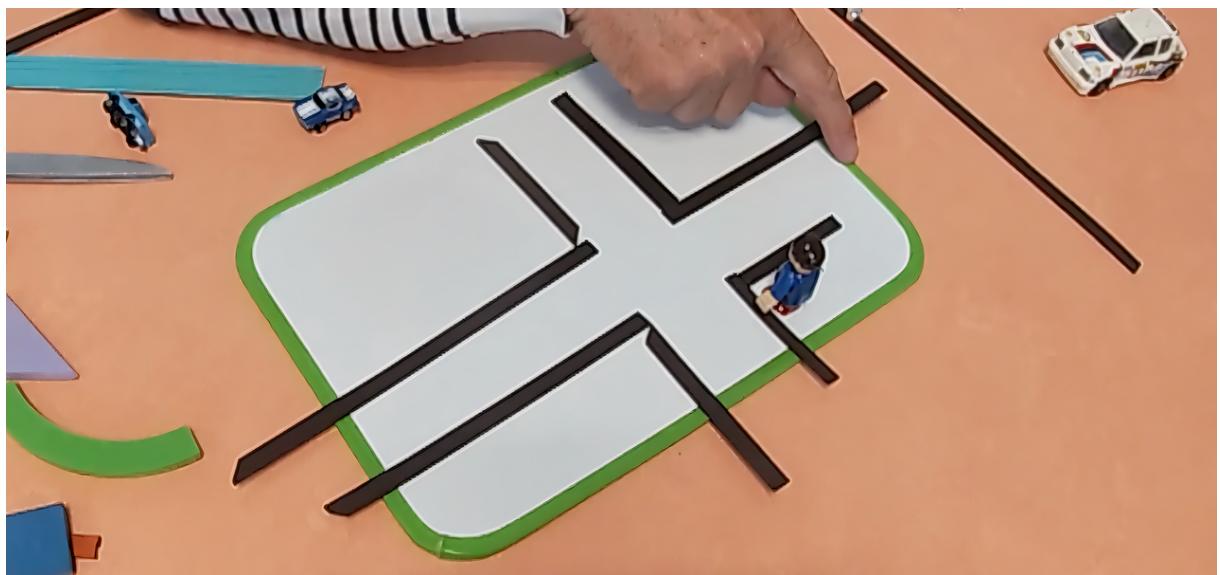


FIGURE 1.1 – Une carte tactile produite par un instructeur avec des aimants et des objets mobiles pour explorer la configuration d'un carrefour. Source : ACTIVmap.

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

partie 1.3.2), la pratique de réalisation des cartes en relief est aujourd’hui majoritairement artisanale. Lors d’une séance de locomotion, un IA réalise parfois une carte de situation en utilisant des aimants (voir figure 1.1). 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.

1.2 Les données géographiques et l’accessibilité

1.2.1 Que sont les données d’accessibilité ?

Dans un 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 figure 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) [ACD19]. 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 [PSG03].

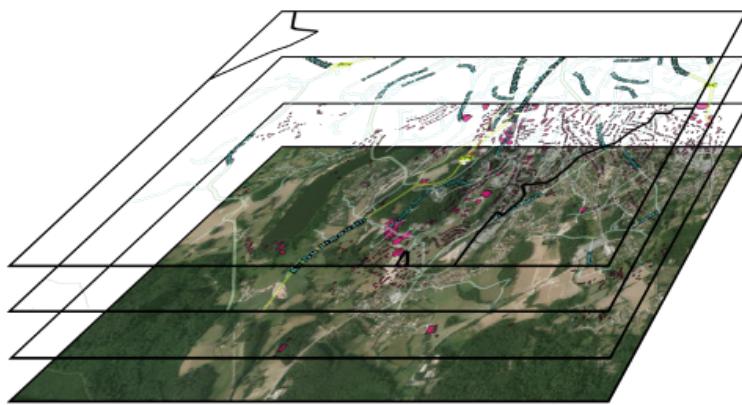


FIGURE 1.2 – Représentation en couches des données géographiques.

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 [DWW14]. L'espace urbain dispose d'infrastructures pour permettre à une 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 figure 1.3).



FIGURE 1.3 – Exemple issu du CEREMA [CER22] sur les bonnes pratiques d’implantation de Bandes d’Éveil de Vigilance (BEV).

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 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 [GP12], pensé pour proposer une représentation 3D de l’espace urbain, est prévu pour être étendu à des usages spécifiques [BKN18]. Cette possibilité est par exemple exploitée par WHEELER et al. [Whe20] 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 [Goo07], 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 [BM15].

1. Sur OSM, une clé est nommée tag.

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 [Bea06]. En France, la disponibilité de ces données d'accessibilité est essentiellement éparpillée 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 [DWW14].

Sur OSM, MOBASHERI et al. [Mob17] 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 [BBS20] en ce qui concerne les trottoirs.

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 [DZ92]. Par ailleurs, elle permet d'inférer des relations spatiales non-explicitelement indiquées dans la description, et ainsi d'adopter un point de vue exocentré [Avr04]. 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 [All00 ; LHM99]. 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 TRÖGER, SCHNEBELT et ALEXANDERSSON [TSA20]. 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 KULYUKIN, NICHOLSON et COSTER [KNC08] 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, GAUNET [Gau06] 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 CONSTANTINESCU et al. [Con19]. BALATA et al. [Bal16] 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 GAUNET [Gau06] 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 figure 1.4).

*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 GAUNET [Gau06] est intégrée à l'itinéraire. Les branches du carrefour sont indiquées.

La génération automatique de description de carrefours est adressée par GUTH et al. [Gut19]. 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.

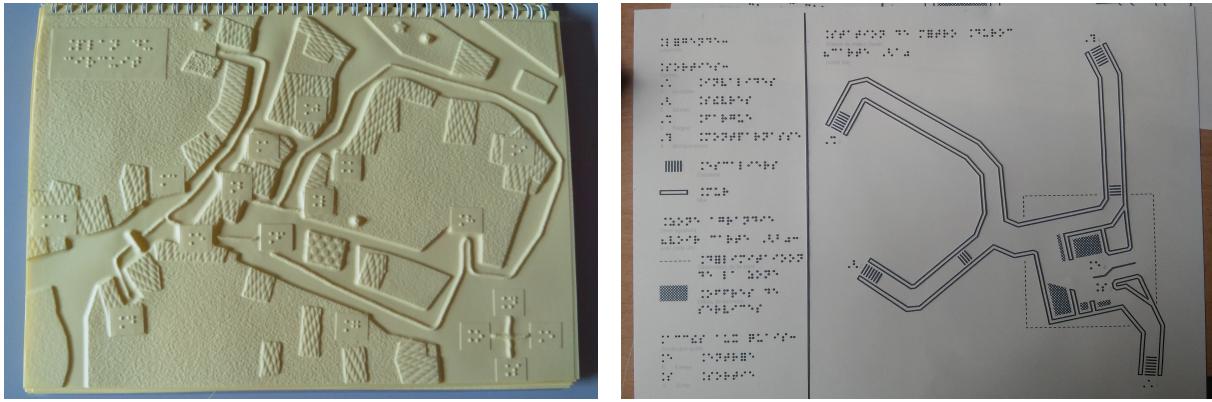
1.3.2 Les cartes en relief

Les cartes en reliefs (voir figure 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 partie 1.1.2). La revue de littérature de WABIŃSKI, MOŚCICKA et TOUYA [WMT22] 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 WABIŃSKI et MOŚCICKA [WM19] 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 MIELE [Mie04], 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

2. <https://compas.limos.fr/ACCRIL/>



(a) Carte thermoformée de la route principale du village de Collonges-la-Rouge. Source : AccèsSens^a.

a. <https://www.accesens.com/>

(b) Carte thermogonflée de la station de métro Duroc à Paris. Source : Institut National des Jeunes Aveugles (INJA).

FIGURE 1.5 – Différents types de cartes en relief. Source : collecte du projet ACCRIL².

à l'aide d'une embosseuse braille³. Cependant, le linéaire de rues utilisé pour générer les cartes provient d'une base de données limitée au territoire américain.

MINATANI et al. [Min10] 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 thermogonflage⁴. 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 WATANABE et al. [Wat14] et ČERVENKA et al. [Čer16] en utilisant la base de données OpenStreetMap comme source afin de permettre la génération de carte tactile sur n'importe quel territoire.

Les travaux évoqués jusqu'ici reposent sur une stylisation de la donnée géographique. Cette dernière n'a cependant pas été pensée pour une représentation tactile et peut présenter des formes complexes difficiles à discerner. ŠTAMPACH et MULÍČKOVÁ [ŠM16] 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.

TOUYA et al. [Tou19] 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'as-

3. 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.

4. 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.

surent pas une exhaustivité sur leur échelle entière sur le thème de l'accessibilité. L'imaginerie aérienne, en fonction de sa résolution, peut permettre de distinguer ces éléments. FILLIÈRES-RIVEAU et al. [Fil20] 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 JIANG et al. [Jia23b] 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 table 1.1). Dans tous les cas, la carte en relief seule ne permet pas de représenter une haute densité d'informations [Tou19], et est plus abordable lorsqu'elle est complétée d'une information sonore [Bro15]. Ce sujet est abordé dans 1.3.3.

Publication	Technique	Généralisé	Automatisé	Couverture	Échelle	Support
[Mie04]	Stylisation	Non	Complet	États-Unis	Rues	Embossage
[Min10]	Stylisation	Non	Complet	Japon	Rues	Thermogonflage
[Wat14; Čer16]	Stylisation	Non	Complet	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[ŠM16]	Stylisation	Oui	Partiel	Mondiale	Rues	Thermogonflage
[Fil20]	Apprentissage profond	Non	Complet	Mondiale	Rues	Impression 3D
[Jia23b]	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.

1.3.3 Les cartes sonores et audiotactiles

Un état des lieux des techniques mobilisables pour sonoriser les données géographiques est proposé par KRYGIER [Kry94], 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. PORTEOUS et MASTIN [PM85] 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 JOSSELIN et al. [Jos16] 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 KRYGIER [Kry94].

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 SCHITO et FABRIKANT [SF18] 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 KRYGIER [Kry94], 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 BEARMAN et LOVETT [BL10] modélise la précision positionnelle de bâtiments en établissant un son spécifique pour chaque valeur de cette variable. Une approche similaire de FOTEINOU et al. [Fot22] 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 les propositions de LÖTZSCH [Löt94] ou encore de LANDAU et GOURGEY [LG01], basées sur une interface tactile reliée à un ordinateur et permettant d'interagir avec celui-ci à l'aide d'un programme spécifique. Talking TMAP [MLG06] est une extension de TMAP [Mie04] permettant d'interagir avec la carte pour obtenir des informations sur l'élément touché par synthèse vocale et repose sur le matériel conçu par LANDAU et GOURGEY [LG01]. L'émergence des écrans tactiles grand public a permis la conception d'outils plus accessibles [Bro15] 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 [Pig23]. Une revue plus exhaustive des dispositifs existants est proposée par KURIAKOSE, SHRESTHA et SANDNES [KSS22].

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 Global Navigation Satellite Systems (GNSS) et SIG [Gol98]. 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 figure 1.6) ou de matériels spécifiques comme les Global Positioning Systems (GPSs) [Ref12].

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 [Dam05]. Certains utilisent ces capteurs pour localiser l'utilisateur sur la base d'une cartographie d'un lieu [Con18]. Les caméras embarquées peuvent également servir d'outil de positionnement à l'aide d'algorithme de vision par ordinateur [Duh21].

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 [Ahm16 ; CNW17]. SHIN et al. [Shi22] 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 [04] et s'activent à l'aide d'une télécommande standardisée.



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>.

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'explorent 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 [Mul20] 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. THOMÉ [Tho21] 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 GUERREIRO et al. [Gue17] est basé sur une application mobile pour suivre virtuellement un guigade GPS et construire une carte mentale du trajet. Enfin, les travaux de ARABSHEIBANI et al. [Ara23] s'inspirent 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 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 [BF77] 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 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 graphe afin de le définir et de le délimiter dans un réseau routier. Les définitions suivantes en définissent la structure :

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 graphe piéton qui n'est pas un ensemble de trottoirs couvrants (voir Figure 2.1).

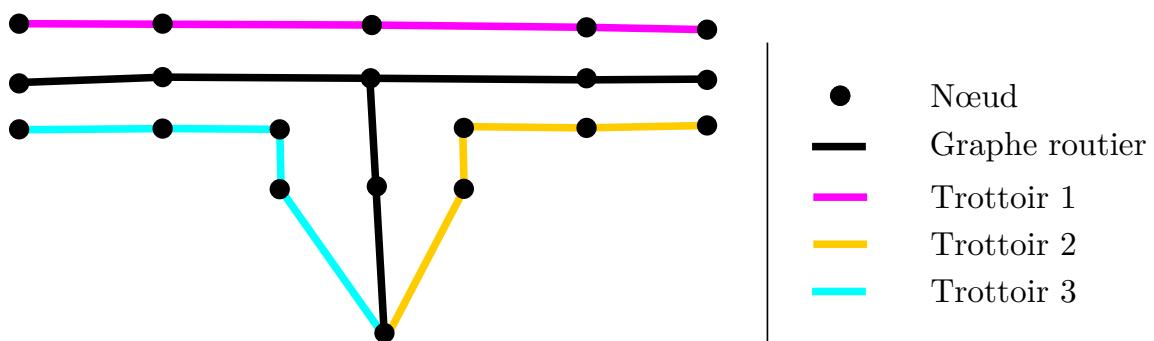


FIGURE 2.1 – L'ensemble des trottoirs n'est pas couvrant car les trottoirs 2 et 3 possèdent un noeud en commun.

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
- 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.

Exemple : Une couverture routière à plusieurs carrefours, dite de quartier (voir figure 2.2).

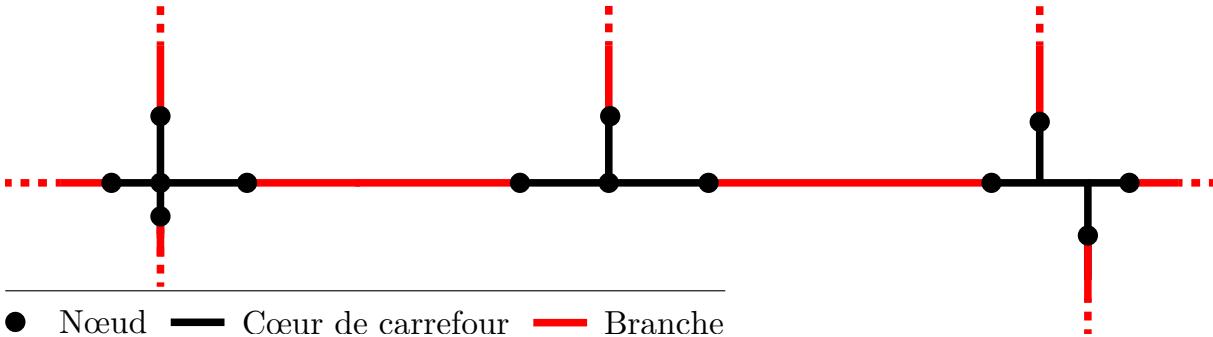


FIGURE 2.2 – Une couverture de quartier comprend plusieurs carrefours.

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).

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

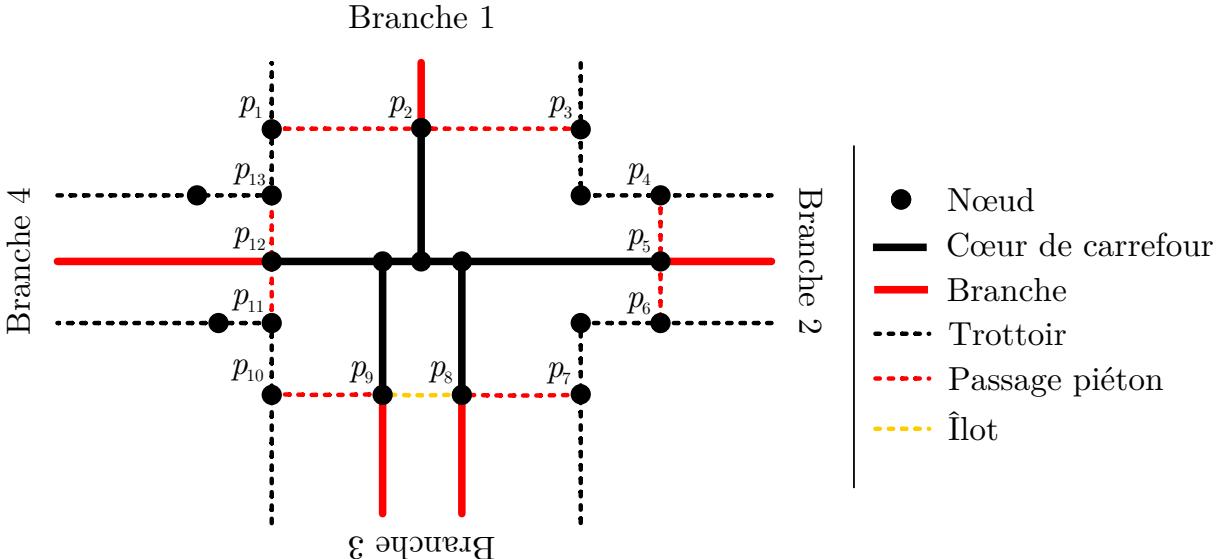


FIGURE 2.3 – Un graphe multimodal d'un carrefour. Les chemins (p_1, p_2, p_3) , (p_4, p_5, p_6) , (p_7, p_8, p_9, p_{10}) et (p_{11}, p_{12}, p_{13}) sont des traversée.

nivellement 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.

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'instar des BEVs 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.

Au-delà des équipements d'accessibilité, le cycle des feux est également utile aux PCDVs pour analyser la circulation et traverser en sécurité [RC19]. 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 [Lop18]. Cependant,

il n'existe actuellement aucun territoire la rendant accessible au sein d'une source de données ouverte.

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. À noter que les relations n'ont pas de géométrie propre mais référencent un ensemble de points et de lignes indépendants de celles-ci

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 supplémentaires 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

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

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

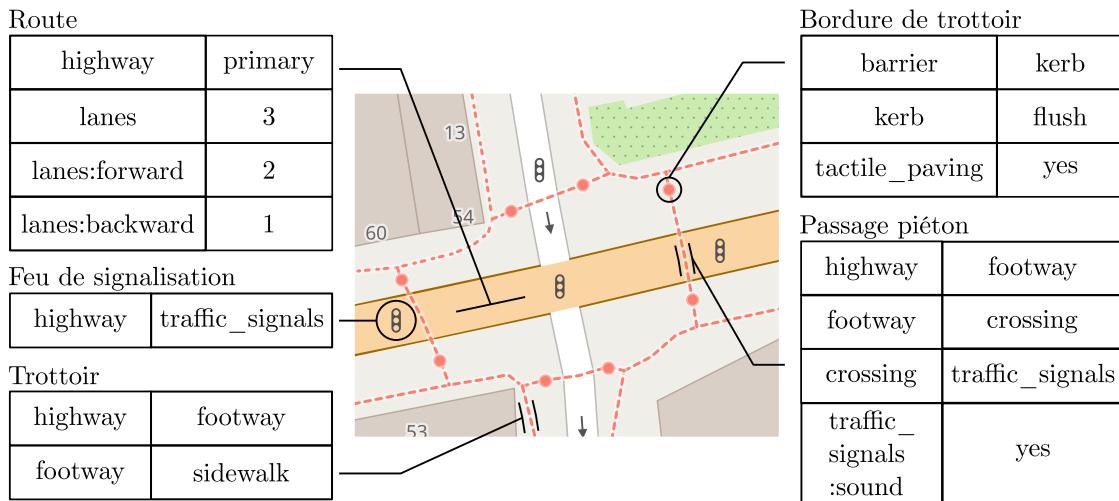


FIGURE 2.4 – Exemple de carrefour et des attributs associés dans OpenStreetMap. Outre le graphe piéton, des indications sur l'équipement d'accessibilité ou la largeur des voies (lanes) sont également présentes. Source : Contributteurs OpenStreetMap.

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 2.5). 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 2.4.

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 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 2.6.

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

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

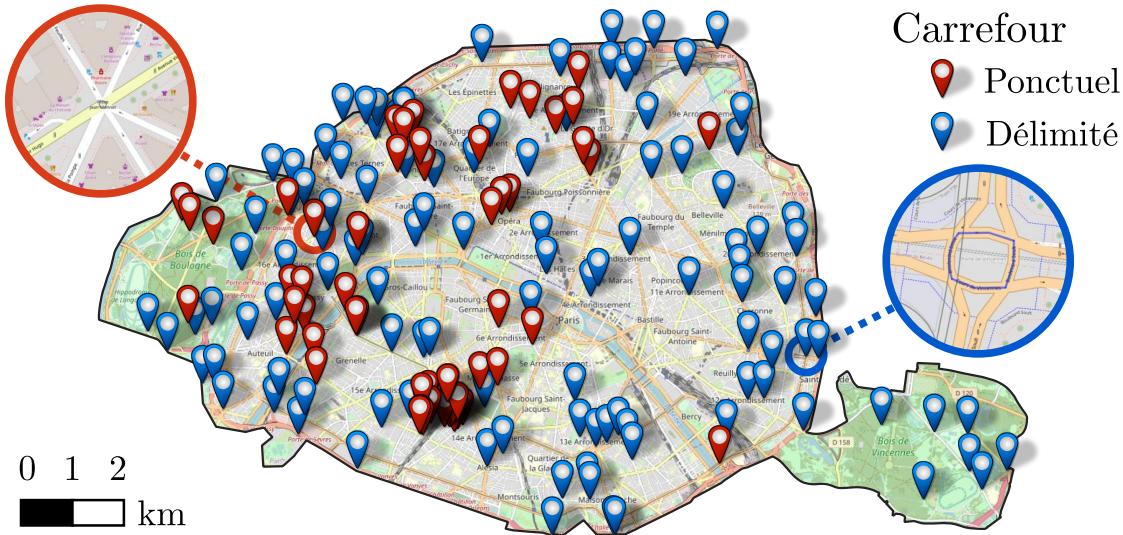


FIGURE 2.5 – À Paris, bien qu'il y ait beaucoup d'objets portant la clé junction, la majorité des carrefours ne sont pas représentés sous cette forme. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

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 2.7). 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 [TG14]. 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

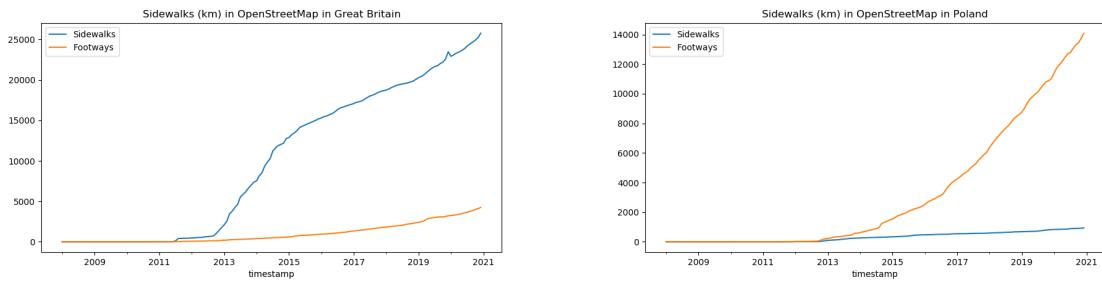
Comme présenté dans la partie 2.2, les objets représentés au sein d'OSM sont définis par un ensemble de clés et de valeurs. Ainsi, pour manipuler chaque objet, il est nécessaire de déterminer l'ensemble des clés et valeurs qui vont le définir. En ce sens, il est plus commode de manipuler un modèle intermédiaire pour lequel cet ensemble est prédéfini. Cette problématique a déjà été abordée au sein des ontologies réalisées autour d'OSM [Cod11 ; Hom17] ou des travaux qui s'appuient sur ces données [TG14]. Cependant, une particularité des 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

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



- (a) Les trottoirs sont ici présents sur les attributs **sidewalk** de la route.
- (b) Les trottoirs sont tracés parallèlement à la route et portent la valeur **footway=footway**.
- (c) Les trottoirs sont tracés en surfaces. Ils contiennent les mêmes valeurs que les trottoirs linéaires, complétés de **area=yes**

FIGURE 2.6 – Illustration des différentes modélisations de trottoirs possibles sur OSM.
Source : Contributeurs OpenStreetMap.



- (a) Évolution de la cartographie des trottoirs en Grande-Bretagne.
- (b) Évolution de la cartographie des trottoirs en Pologne.

FIGURE 2.7 – 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>.

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 [Gam94]. 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 2.8, 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 2.9. Il représente un graphe du carrefour, dont la classe Node figure les nœuds 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

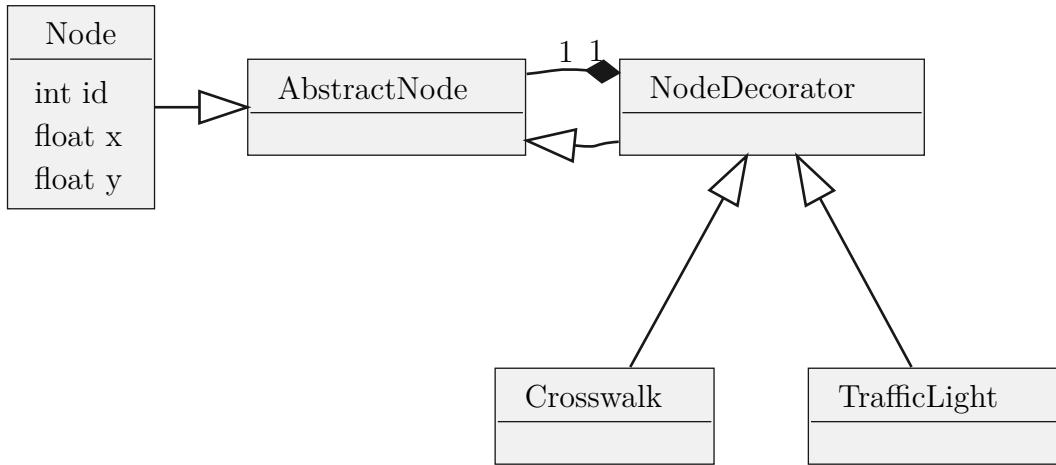


FIGURE 2.8 – Modèle OSM-Objet. Les classes Crosswalk et TrafficLight sont présentes pour illustrer l'utilisation.

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-mêmes sont composés 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 2.10a. 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 2.10b.

Comme évoqué en partie 2.2.2 l'infrastructure piétonne est aujourd'hui encore rare-

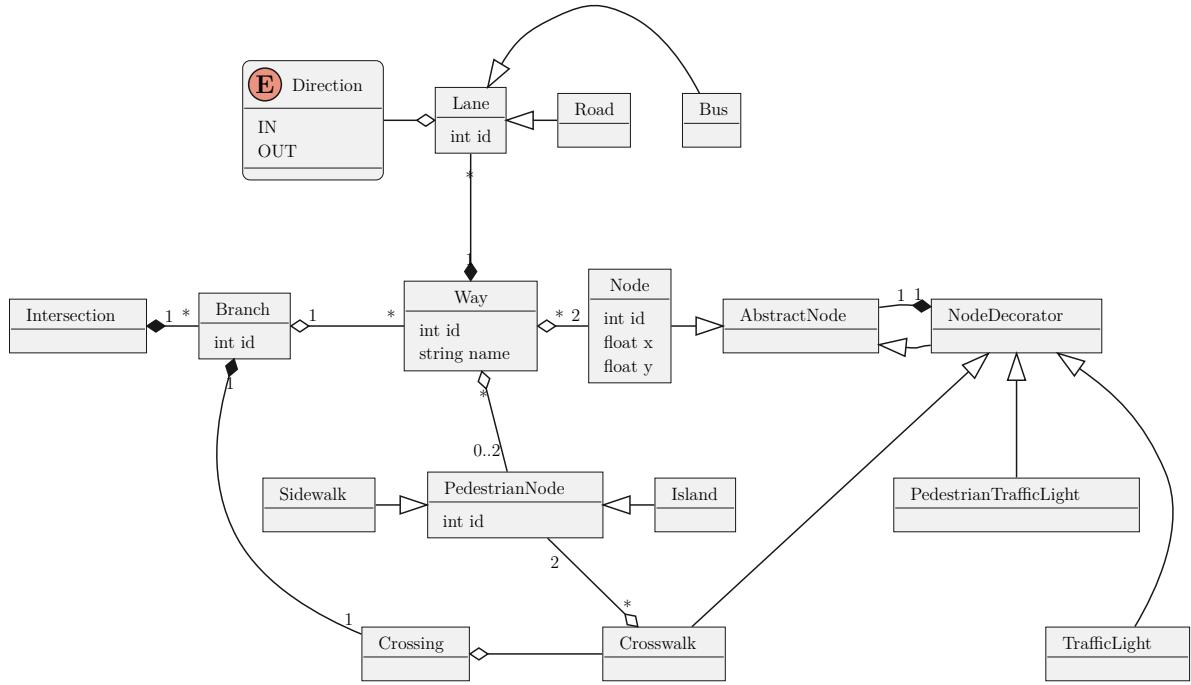


FIGURE 2.9 – Modèle CrModel architecturé autour d’OSM-Objet.

ment modélisée séparément de la route. Par conséquent, nous proposons dans la suite de cette partie de considérer uniquement la donnée contenue par les nœuds 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`),
- le type de route, si elle correspond à un carrefour (`junction` ou `highway = ↗ *_link`),
- le nom de la route (`name`),
- le type du noeud 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 [FK22] et [KFT22].

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 2.11). Les **arêtes adjacentes** d’une région sont identifiées comme les arêtes



(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 une branche sans marquage (ligne rouge).

FIGURE 2.10 – Les bordures des carrefours sont situées au niveau des infrastructures, si elles existent. Fond de plan : Géoportail © IGN. Source : [FK22].

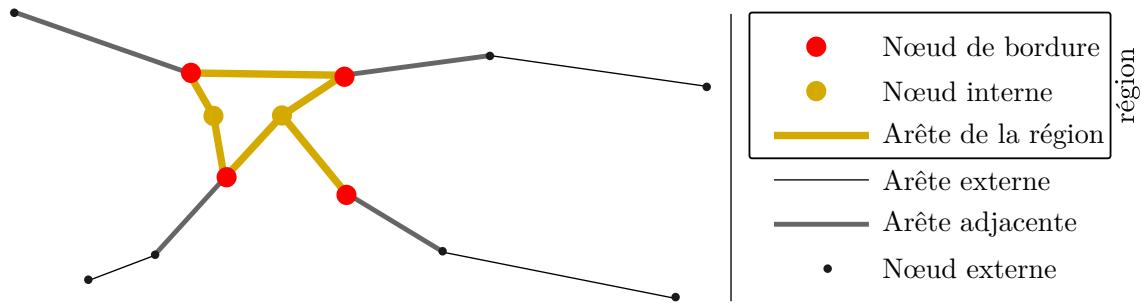


FIGURE 2.11 – Exemple de région définie dans le graphe. Source : [FK22].

qui n'appartiennent pas à la région, mais dont une des extrémités en fait partie.

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 2.12a) 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 2.12b). 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,

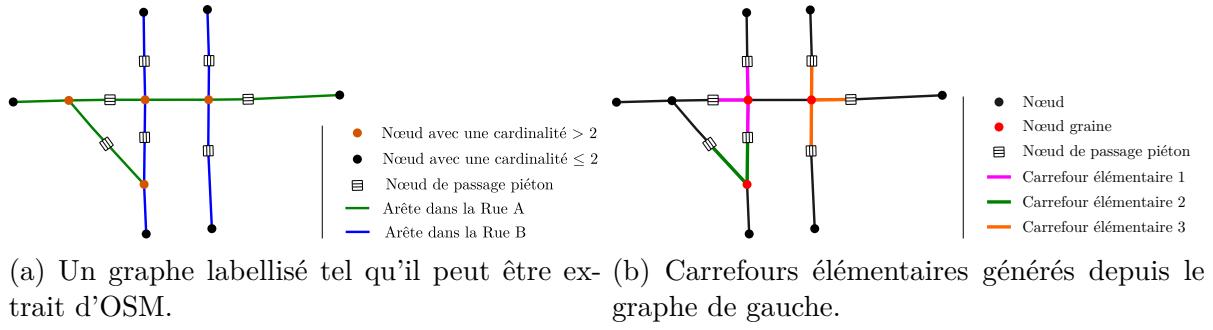


FIGURE 2.12 – Résultat de la segmentation d'un carrefour élémentaire. Source : [FK22].

la géométrie et la topologie des arêtes adjacentes à chaque carrefour, nous proposons un algorithme pour assembler les carrefours élémentaires en carrefours fonctionnels.

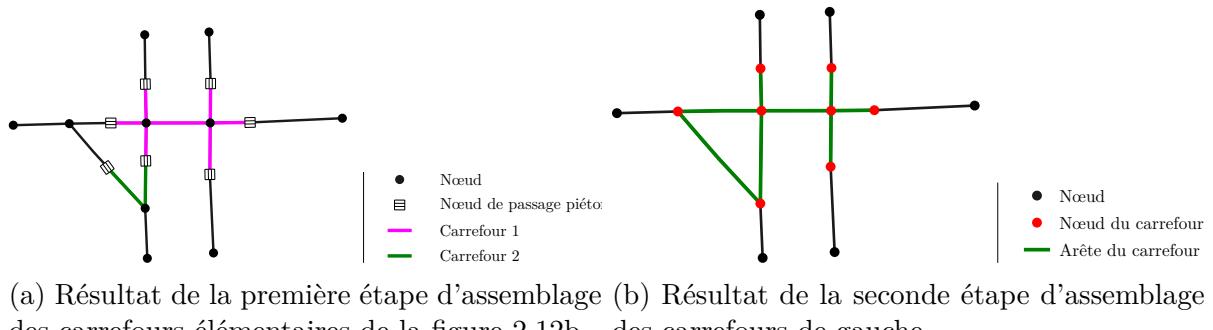


FIGURE 2.13 – Résultat de l'assemblage des carrefours élémentaires. Source : [FK22].

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 2.13a). La seconde étape consiste ensuite à identifier les ensembles de carrefours connectés par un cycle court, et de les agrggerer en carrefours 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 2.13b).

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 4.1).

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 2.14).

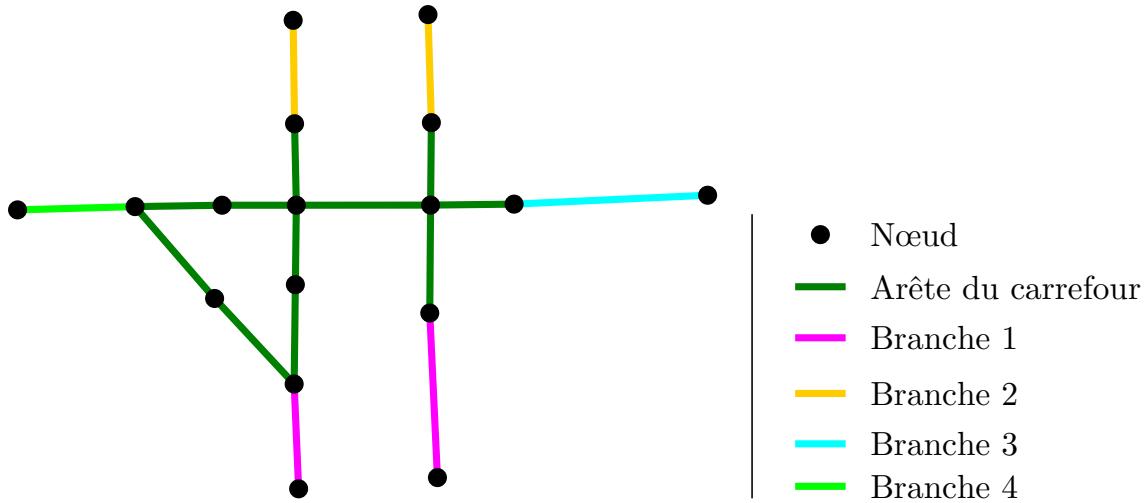


FIGURE 2.14 – Segmentation des branches depuis le carrefour fonctionnel de la figure 2.13b et utilisant les noms de rue donnés en figure 2.12a. Source : [FK22].

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 noeud est considéré comme un noeud de bordure d'un carrefour donnée.
- 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.

2.4.2.1 Probabilité d'appartenance à un carrefour ou sa bordure

Pour modéliser la probabilité qu'un noeud ou une arête appartiennent à un carrefour et la probabilité qu'un noeud 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 noeuds labellisés comme passages piétons appartiennent à la bordure d'un carrefour (*oui fort*),
- les noeuds 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 noeuds avec une cardinalité supérieure ou égale à quatre sont des noeuds internes à un carrefour (*oui fort*),
- les noeuds 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 noeuds, 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 noeud 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 noeuds, on propage la construction d'une région le long des chemins adjacents, en intégrant un chemin uniquement s'il atteint un noeud identifié comme possible bordure du carrefour, et à une distance raisonnable, en fonction de la largeur des voies autour du noeud initial.

Si un possible noeud 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 noeud de bordure fortement considéré soit présent un peu plus loin.

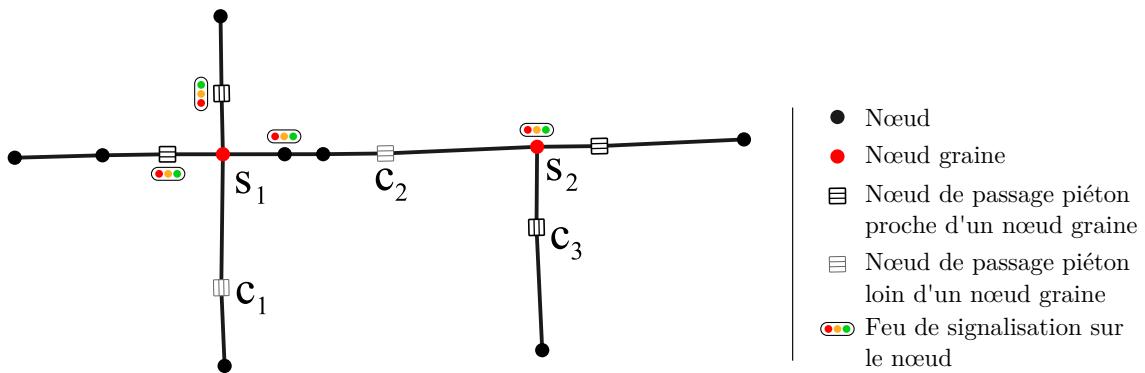


FIGURE 2.15 – Deux nœuds graines où des régions élémentaires seront calculées. Source : [FK22].

La figure 2.15 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 noeuds. Ainsi, le carrefour construit depuis la graine s_1 (figure 2.15) 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 , 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.

$$\text{length}(b, s) \leq C_0 \max_{e \in E_s} w_e \quad (2.1)$$

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 $C_0 = 2$ donne de bons résultats dans les centres historiques européens.

Dans la sélection proposée dans la figure 2.15, 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 donnée dans la formule (2.2), où 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 .

$$p_{i_1, i_2} = C_1 \alpha_{i_1, i_2} \max\{w(i_1), w(i_2)\} \quad (2.2)$$

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 différente (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 2.16 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 centres historiques européens.

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

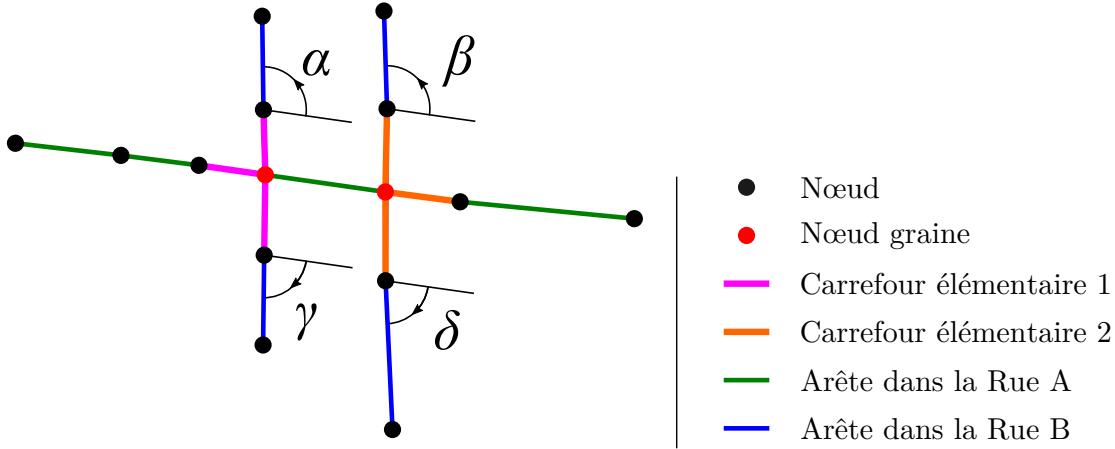


FIGURE 2.16 – Deux carrefours élémentaires dont la proximité entre les noeuds graines nécessite la prise en compte de la configuration des arêtes adjacentes. Ces deux carrefours élémentaires ont deux paires d’arêtes adjacentes ($\{\alpha, \beta\}$ et $\{\gamma, \delta\}$) avec le même nom, des directions consistantes, et des directions significativement différentes au regard du segment défini par les deux graines initiales. Source : [FK22].

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 noeuds 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 C_2 . D’abord, on sélectionne uniquement les chemins de liaison courts qui vérifie la formule refeq:0004, où w_k est la largeur maximum des voies dans k .

$$\text{length}'(k) \leq w_k C_2 \quad (2.4)$$

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 2.13b), les carrefours complexes qui contiennent des polylignes décrivant les chemins internes du carrefour, mais aussi les ronds-points (voir figure 2.17).

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 noeud 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 2.18.

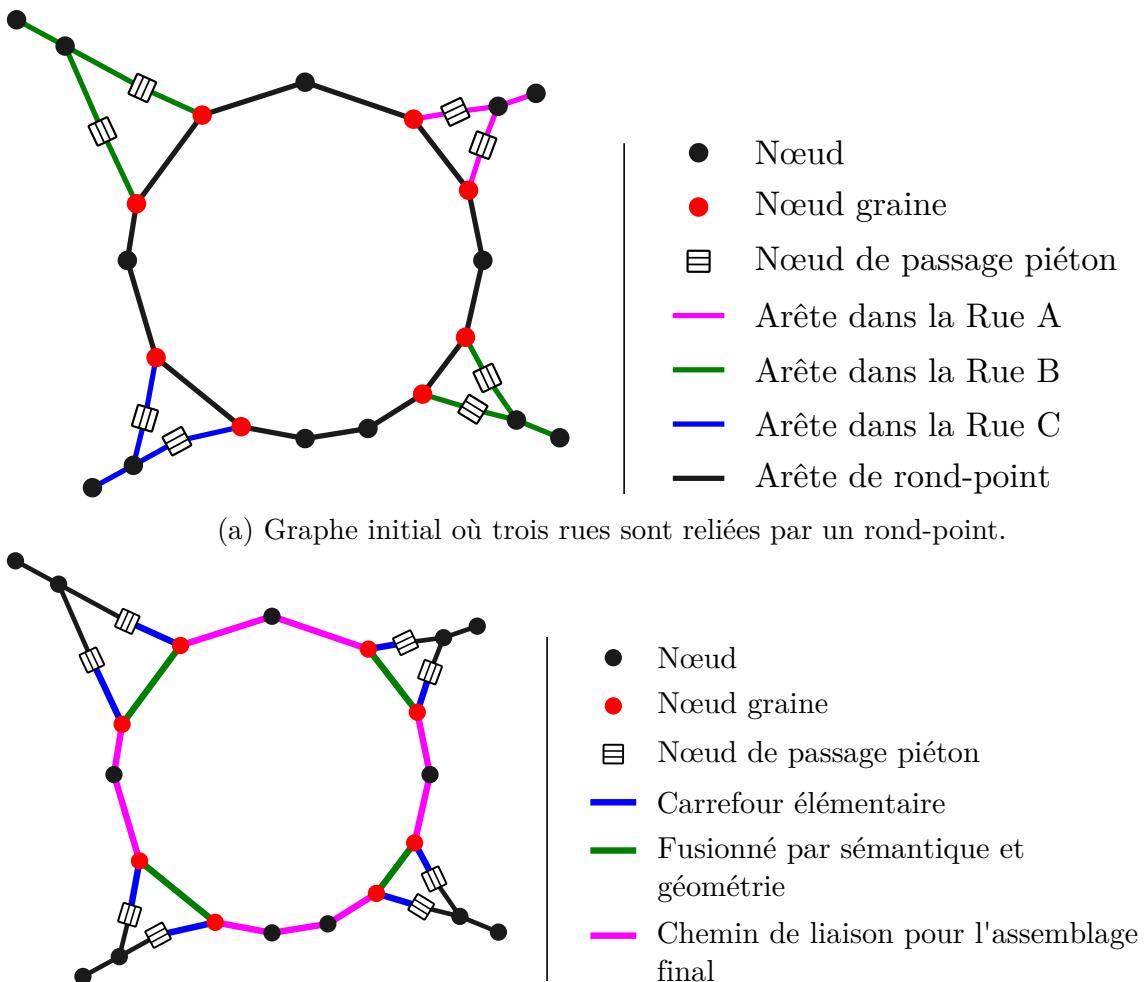
2.4.3 Calcul des informations piétonnes

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.

2.4.3.1 Aggrégation des trottoirs

Dans OSM, les trottoirs identifiés sous forme de sémantique sur le réseau routier ne sont pas aggrégés 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'aggréger 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 2.14) ne sont pas ordonnées, donc nous les ordonnons dans le sens des aiguilles d'une montre en calculant le chemin longeant la bordure du graphe (voir figure 2.19.2). Pour chaque branche du carrefour, une par une dans le sens des aiguilles d'une montre, on part du noeud 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 2.19.3). Le chemin traversé correspond alors à un trottoir (voir figure 2.19.4). 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



(b) Transformation pas-à-pas du rond-point en carrefour. Après avoir identifié les huit nœuds graines, chaque carrefour élémentaire est construit, ajoutant un chemin vers le passage piéton le plus proche. Chaque paire de carrefours ayant une voie adjacente portant le même nom de rue, elles sont assemblées en quatre carrefours. Enfin, une boucle est identifiée en connectant ces carrefours le long du chemin du rond-point.

FIGURE 2.17 – Illustration du processus dans un rond-point. Source : [FK22].

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 [Vit22]. Pour cela, il faut tout d'abord fermer les branches composées de plusieurs arêtes (voir figure 2.20.1) pour obtenir des faces et détecter l'intégralité des îlots (voir figure 2.20.2).

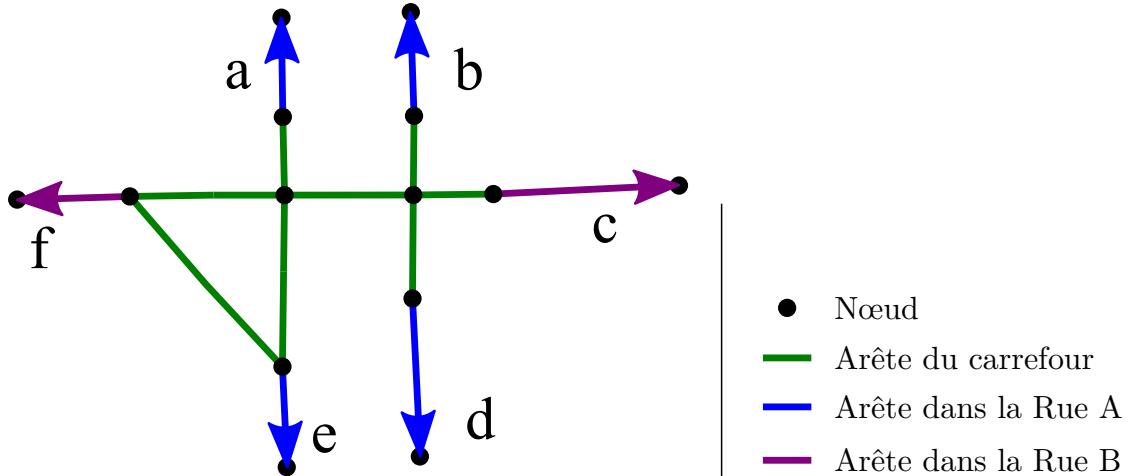


FIGURE 2.18 – La sémantique de chaque arête adjacente de ce carrefour contient le nom de la rue. On peut alors les grouper en utilisant ces noms et une direction consistante pour calculer les branches correspondantes : {a, b}, {c}, {d, e}, {f}. Source : [FK22].

2.4.3.3 Génération des traversées

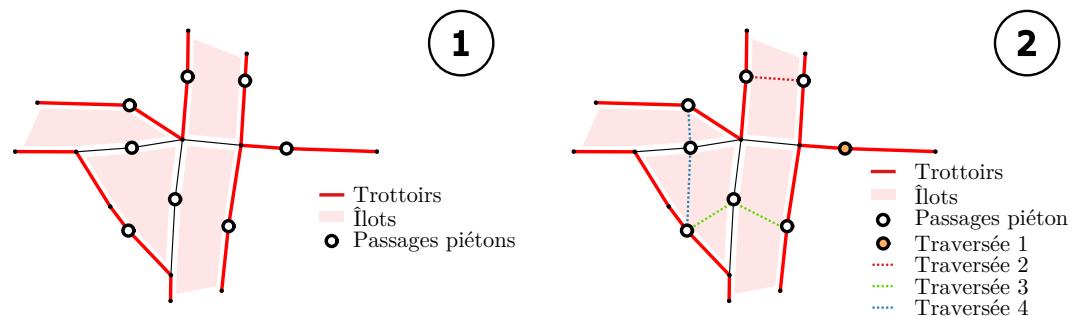
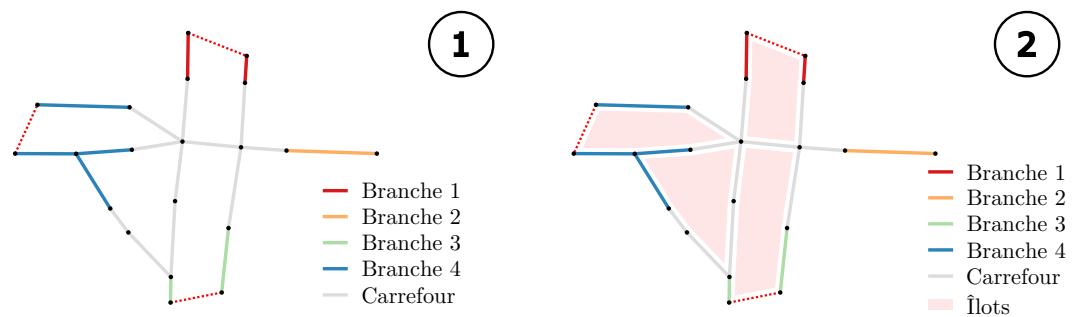
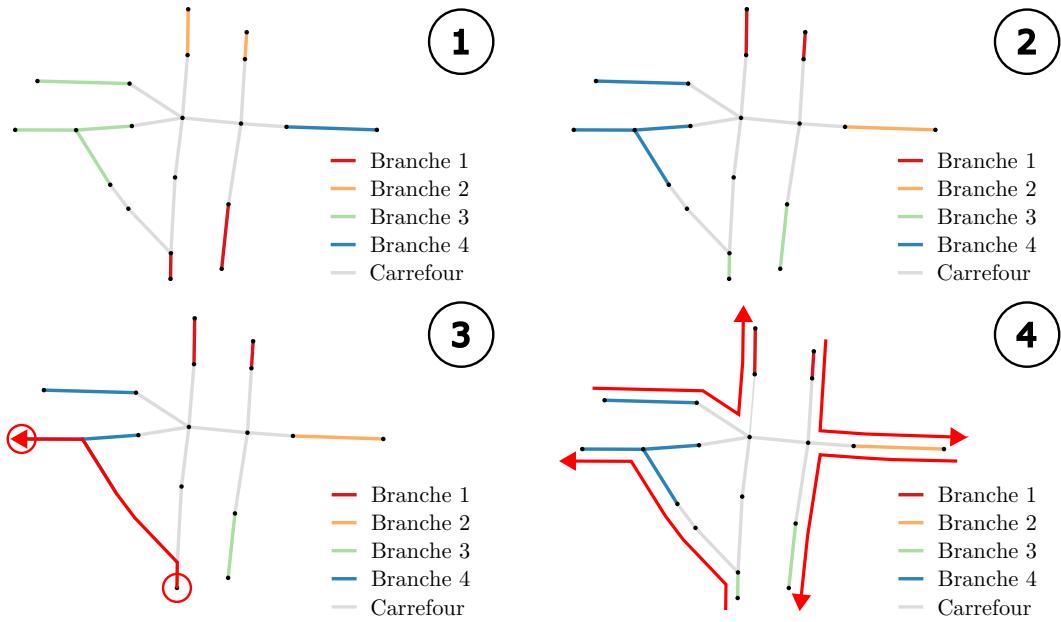
Après avoir généré les trottoirs et les îlots, une traversée correspond à une séquence de passages piétons permettant de traverser d'un trottoir à un autre en passant uniquement par des îlots. On peut alors générer ces traversées en utilisant un graphe dual où les trottoirs et les îlots deviennent des noeuds, 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 2.21).

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 éparses 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

Les descriptions textuelles et verbales font partie des outils mobilisés par les personnes concernées par la déficience visuelle pour effectuer un déplacement. Ces descriptions peuvent provenir de dispositifs de guidage, comme une application mobile, et être générées en cours de trajet et lue par synthèse vocale. Bien que les outils technologiques d'aide à la mobilité soient utilisés par une partie des personnes concernés (32% d'après PIGEON et al. [Pig23]), les dispositifs de navigation existants ne sont pas pleinement satisfaisants à cause d'une localisation imprécise et d'informations piétonnes manquantes [Gut19]. Au niveau des carrefours notamment, ces imprécisions ne permettent pas de guider une personne de manière sécurisée, en décrivant intégralement une traversée et la qualité de son équipement. Pour un besoin spécifique et sur un itinéraire donné, un IA peut préparer manuellement une description, dont le niveau de détails pourra par ailleurs être adapté aux besoins de la personne destinataire, et intégrer toutes les informations nécessaires en se basant sur sa connaissance du terrain. La réalisation d'une telle description est, en revanche, particulièrement chronophage, car elle est spécifique à chaque terrain étudié et chaque besoin [Ker16].

Pour répondre à cette problématique, dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la manière de réaliser une description de manière semi-automatique en se basant sur des données géographiques. Nous présenterons dans un premier temps le processus général, fortement basé sur les capacités d'un Système d'Information Géographique et nécessitant par conséquent des connaissances spécifiques, puis nous montrerons son application à différents cas d'usages qui peuvent aller au-delà du texte linéaire.

3.1 Des données géographiques au texte

Nous avons vu dans le chapitre 2 qu'il pouvait exister des données suffisamment complètes pour proposer une modélisation du carrefour. Cette modélisation peut avoir des applications multiples (voir chapitre 4) dont la génération d'une description textuelle de celui-ci en suivant une approche données vers texte [Rei07]. Cette approche a notamment été suivie par GUTH et al. [Gut19] et BALATA [Bal18] pour produire des descriptions de carrefours et de leurs traversées, mais en utilisant des données conçues à cet effet et non des données issues d'une base de données publiques. Par ailleurs, les descriptions proposées sont figées, adaptées à un contexte unique qui ne correspond pas forcément à la variété des besoins exprimés par les instructeurs pour l'autonomie et les personnes concernées. Au-delà du carrefour, des besoins spécifiques peuvent impliquer la modulation du texte

(vocabulaire, verbosité), mais également l'intégration de données nouvelles pour décrire des éléments extérieurs à la voirie (par exemple, les arrêts de bus). Ainsi, nous souhaitons proposer un outil flexible qui permettrait à l'instructeur de concevoir une description selon les besoins exprimés et de générer le texte correspondant sur différentes localisations. L'ajout de données arbitraires amène à généraliser le problème à la création d'un texte depuis toute donnée géographique.

Plusieurs problématiques émergent cependant de cette possibilité : au sujet des carrefours, les chapitres 2 et 5 montrent que les données ou les résultats des traitements algorithmiques sur celles-ci sont parfois incomplets ou incorrects et peuvent nécessiter une correction. Par ailleurs, toute donnée n'est pas nécessairement adaptée à une verbalisation et peut nécessiter un traitement en amont pour la textualiser, à l'instar des traitements réalisés sur une donnée pour la cartographier. Ces traitements sont généralement réalisés au sein d'un Système d'Information Géographique par un cartographe ou un géomaticien, or les instructeurs pour l'autonomie comme les adaptateurs-transcripteurs n'ont généralement pas les connaissances pour manipuler ces outils. Pour répondre à ces problématiques, nous proposons d'ajouter le géomaticien comme intermédiaire supplémentaire à la chaîne de génération de description. Ce dernier sera ainsi l'utilisateur principal de l'outil proposé et pourra intégrer les besoins des différentes parties au sein d'une chaîne de traitements de données géographiques permettant de générer du texte.

3.1.1 Définition de la description

Pour lire des documents textuels virtuels, les personnes déficientes visuelles utilisent généralement un lecteur d'écran, un logiciel qui retranscrit par synthèse vocale ce qui est affiché sur l'écran du terminal. Une particularité des lecteurs d'écran est qu'ils ne font pas une simple retranscription texte vers voix mais qu'ils retranscrivent aussi la structure du document lu. Cela signifie qu'en parcourant le document, la personne sera informée des titres, des paragraphes, des listes, etc. La lecture est par ailleurs interactive : il est possible de sauter un paragraphe, de revenir au précédent, ou encore de parcourir un à un les éléments d'une liste.

Dans la suite de ce chapitre, une description sera définie par un texte possiblement augmenté, c'est à dire un texte dont les éléments sont annotés pour enrichir son contenu. Ces annotations permettent notamment la réalisation d'un document structuré mais aussi d'organiser les textes entre eux.

3.1.2 Spécification du système de conception de description

Un Système d'Information Géographique est un système informatique permettant l'acquisition, le stockage, l'interrogation, le traitement, l'analyse, et la visualisation de données géographiques [ACD19]. Il peut s'agir d'un logiciel de bureau utilisable au travers d'une interface graphique ou d'un système architecturé autour d'une base de données spatiales. Le modèle de représentation le plus courant au sein d'un SIG consiste en un empilement de couches thématiques : chaque couche étant un fichier indépendant avec ses propres attributs et métadonnées (projection, sémantique, géométrie). On distingue en général les couches de type raster (image multispectrale dont chaque pixel a une valeur) des couches de type vecteur (donnée tabulaire dont un ou plusieurs champs peuvent contenir une géométrie), ces dernières ayant un fonctionnement proche des tables telles

qu'elles existent dans les Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles.

Un des intérêts des SIG concerne la possibilité d'y réaliser des chaînes de traitements, c'est-à-dire une succession de traitements appliqués à un ensemble de données en entrées pour obtenir un nouvel ensemble de données en sorties. Cela peut inclure entre autres des sélections basées sur la sémantique ou la géométrie, des jointures entre couches et des modifications ou des créations de champs attributaires ou géométriques. Ces chaînes permettent de généraliser un traitement complexe pour l'appliquer sur plusieurs ensembles de données et sur plusieurs territoires. À l'instar des traitements qu'elles embarquent, elles peuvent également être paramétriques afin de piloter leur exécution si nécessaire. Des outils se reposant sur ce système de chaînes de traitement SIG ont déjà été proposés par la littérature, par exemple pour réaliser des « cartes à la carte » [Bucher, 2007].

Le cadre de conception de description que nous proposons se repose sur une chaîne similaire à celle que l'on pourrait mobiliser pour générer une carte. En effet, la réalisation d'une carte repose sur trois grandes étapes : la spécification du style, où l'on détermine la forme que l'on souhaite obtenir, le rendu, où l'on mobilise des outils pour traiter les données, et la visualisation, où l'on exécute la chaîne pour obtenir le résultat final [Christophe, 2016]. La spécification du style correspond ici à la conception du canevas modulaire, c'est-à-dire à la conception du texte que l'on souhaite générer et ses variantes possibles. Le rendu correspond aux traitements qui seront appliqués sur les données pour les adapter au contexte et permettre leur textualisation. Enfin, la visualisation correspond à l'exécution de la chaîne de traitements pour obtenir le résultat. Dans notre cas, plusieurs acteurs seront mobilisés à chaque étape. En effet, on considère que l'IA se repose sur un géomaticien pour la conception technique de la chaîne de traitement. En revanche, il conserve un rôle de commanditaire : il doit ainsi avoir une idée précise du résultat souhaité pour en permettre l'implémentation. Ces différentes étapes sont détaillées dans les parties suivantes.

3.1.2.1 Conception d'un canevas modulaire

Cette première étape consiste à définir exactement les besoins, qui vont notamment s'exprimer par la sortie souhaitée. Pour cela, l'IA va concevoir les formes de description finales : quels seront les textes et leurs éventuelles variations, quels seront leur agencement et leur mise en forme (voir parties 3.2.1, 3.2.2 et 3.2.3).

Avec cette vision finale de la description, l'instructeur peut déterminer les données nécessaires pour la réaliser la description. Il ne s'agit pas ici de déterminer les données disponibles (qui seront acquises et traitées par un géomaticien en partie 3.1.2.2) mais d'estimer les données thématiques et les attributs nécessaires afin, pour chacune, de définir un patron, c'est-à-dire un texte conditionnel qui pourra varier selon les attributs de la donnée. Par ailleurs, il est possible de définir plusieurs patrons pour une donnée, chacun correspondant à un usage (par exemple un patron synthétique et un patron détaillé). Chaque patron est par ailleurs augmenté d'attributs permettant de le caractériser, dont le choix est à la discrétion de l'instructeur.

On parle de canevas modulaire car la forme finale de la description n'est pas nécessairement figée et peut varier selon des paramètres définis à la conception. Il peut s'agir lors de l'assemblage du texte final de la sélection de patrons spécifiques et leur ordonnancement, ou de variations sur le vocabulaire.

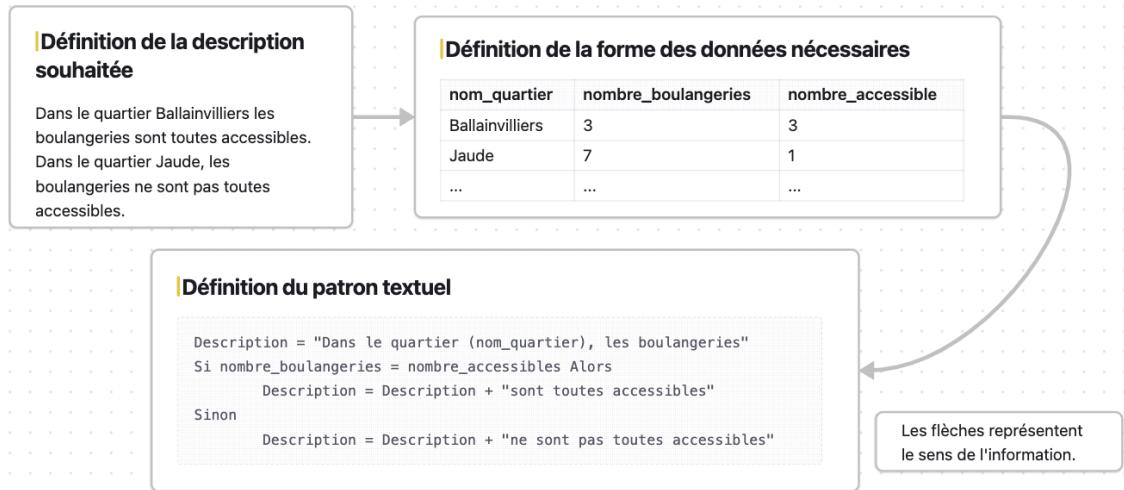


FIGURE 3.1 – Cet exemple illustre la conception d'un canevas pour générer un résumé par quartier de l'accessibilité des boulangeries.

La conception du canevas est illustrée en figure 3.1.

3.1.2.2 Conception de la chaîne de traitement SIG

Après la définition du besoin par l'IA, le géomaticien a en charge l'implémentation de la chaîne de traitements au sein d'un SIG. Pour cela, il doit tout d'abord identifier et évaluer les sources de données disponibles au regard du besoin. L'évaluation comprend ici la précision des données, qui peut être à la fois la précision métrique mais aussi le niveau de détails (pour un trottoir par exemple, a-t-on besoin de lignes ou de polygones ?) ou encore la couverture géographique (est-ce que la description doit pouvoir s'appliquer partout ou sur un territoire donné ?).

Une fois les données connues, il peut réaliser la chaîne de traitements SIG qui s'articule autour des trois étapes suivantes :

1. Traitement des données pour les adapter au contexte

Entrée : Données géographiques

Sortie : Données géographiques

En ayant maintenant les données à sa disposition, le géomaticien peut utiliser les outils du SIG pour réaliser des traitements sur celles-ci. À l'instar des traitements réalisés pour faire une carte (généralisation géométrique, conception de nouveaux indicateurs) il s'agit ici d'adapter les données à l'usage, ici la réalisation du texte déterminé par les patrons. Cela peut signifier calculer de nouveaux champs, résumer une donnée, réaliser des jointures, etc. Les traitements pourront différer d'une donnée à l'autre et d'une description à l'autre.

2. Implémentation des patrons conçus par l'IA

Entrée : Données géographiques

Sortie : Données géographiques décrites et annotées

Pour chaque entité de chaque couche en entrée, le géomaticien implémente les patrons conçus par l'instructeur en fonction des nouvelles données créées lors de l'étape 1. Il définit également l'ensemble des métadonnées associées aux couche pour permettre leur sélection dans l'étape d'assemblage.

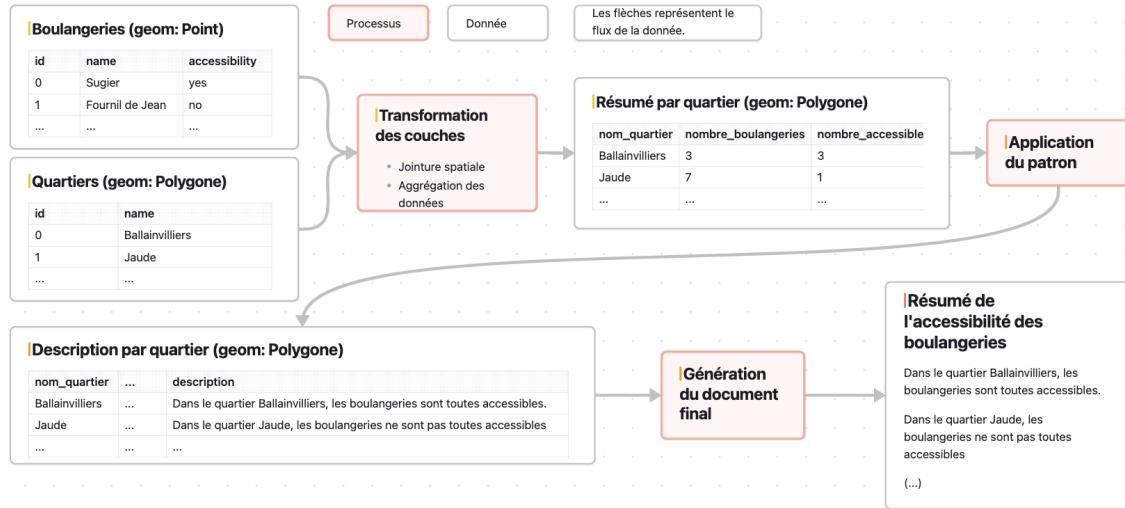


FIGURE 3.2 – La chaîne de traitement produite par le géométricien pour générer l'exemple des boulangeries.

3. Assemblage des textes en description

Entrée : Données géographiques décrites et annotées

Sortie : Description

Cette étape correspond à l'assemblage qui va permettre de sélectionner et d'agencer les couches décrites en étape 3 au sein de la description, en accord avec le canevas établi par l'IA.

Le processus est illustré en figure 3.2

3.1.2.3 Réalisation d'une description

L'utilisateur final de l'outil est l'IA. Une fois la chaîne réalisée, il va pouvoir la mobiliser sur différents territoires pour générer des descriptions pour les personnes déficientes visuelles avec lesquelles il travaille le déplacement autonome.

3.2 Cas d'utilisation : la description des carrefours

Le cadre présenté en partie 3.1 permet de générer du texte brut ou augmenté depuis toute donnée géographique. S'il permet une application à une diversité de cas d'usage, les notes se concentrent spécifiquement sur la description de carrefour à destination de PCDV. Dans cette partie nous nous intéressons à trois applications du cadre présenté à la description de carrefour, dont la variété des objectifs et des supports permettent d'illustrer la souplesse du processus.

3.2.1 La réalisation d'une description textuelle

On appelle description exocentrale une description dont la position des éléments spatiaux est décrite de manière générale et non relativement à un point donné.

La lecture d'une description exocentrale est analogue à la lecture d'une carte exocentrale : les informations présentées ne nécessitent pas de traitement en temps réel et sont

intrinsèques à l'objet décrit. Cependant, comme présenté dans la partie 3.1, une description exocentrale ne décrit pas nécessairement des données brutes. Un traitement adapté au texte voulu peut être réalisé sur celles-ci pour intégrer du contexte spatial. Ainsi, il est possible dans une description exocentrale de décrire une relation spatiale (« la boulangerie est dans un quartier ») ou une orientation relative aux points cardinaux,.

Une description égocentrale est une description dont la position des éléments spatiaux est présentée de manière relative à un sujet et écrite à la première personne. Le sujet est placé virtuellement au sein de l'environnement. Le texte peut alors mobiliser des prépositions spatiales telles que « en face », « à droite »...

3.2.2 La réalisation d'une description dans la carte

Une description, si elle conserve des attributs géographiques, peut également être intégrée au sein d'une carte interactive. Si toute carte dématérialisée permet d'embarquer du texte au sein des objets qu'elle représente (généralement accessible par une infobulle), des dispositifs physiques tels que DERi [Bro12] permettent de déclencher un son lors de l'appui sur un interacteur. Ainsi, lors de la préparation du canevas modulaire, où pour chaque donnée décrite un texte est associé à chaque entité, il est possible d'intégrer ces entités non-pas au sein d'un document textuel mais d'une carte qui permet d'accéder à la description de chaque entité indépendamment.

3.2.3 La réalisation d'une description sous forme de graphe

Le cadre défini dans la partie 3.1 présente une description comme un ensemble de textes augmentés pouvant embarquer des informations supplémentaires pouvant permettre une mise en forme élaborée de la description finale. Une des mises en forme possible consiste en la création d'un graphe de textes. En définissant à chaque en ensemble de voisins, il devient possible d'utiliser la description pour représenter topologiquement un environnement (voir figure 3.3).

3.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié la problématique de la description textuelle de données géographique, au-delà des carrefours, avec un focus particulier sur l'accessibilité du texte aux PCDV.

Nous avons proposé un cadre de conception de description intégré à un SIG. Ce cadre propose de partir du besoin exprimé par l'IA pour permettre à un géomaticien d'implémenter une chaîne de traitement qui, à partir de données géographiques, réalise la description nécessaire et permet d'appliquer, en fonction de la qualité des données, cette description sur plusieurs territoires. Le besoin de modularité exprimé par les instructeurs est intégré sous la forme de paramètres permettant à l'exécution d'agir sur la description générée : verbosité, vocabulaire, etc.

Les outils permettant de réaliser la chaîne de traitement ont été implémentés dans le SIG QGIS et leur fonctionnement technique est présenté au chapitre 4. Par ailleurs, l'évaluation des capacités du dispositif à générer des descriptions effectivement exprimées par des IA est présentée en chapitre 5.

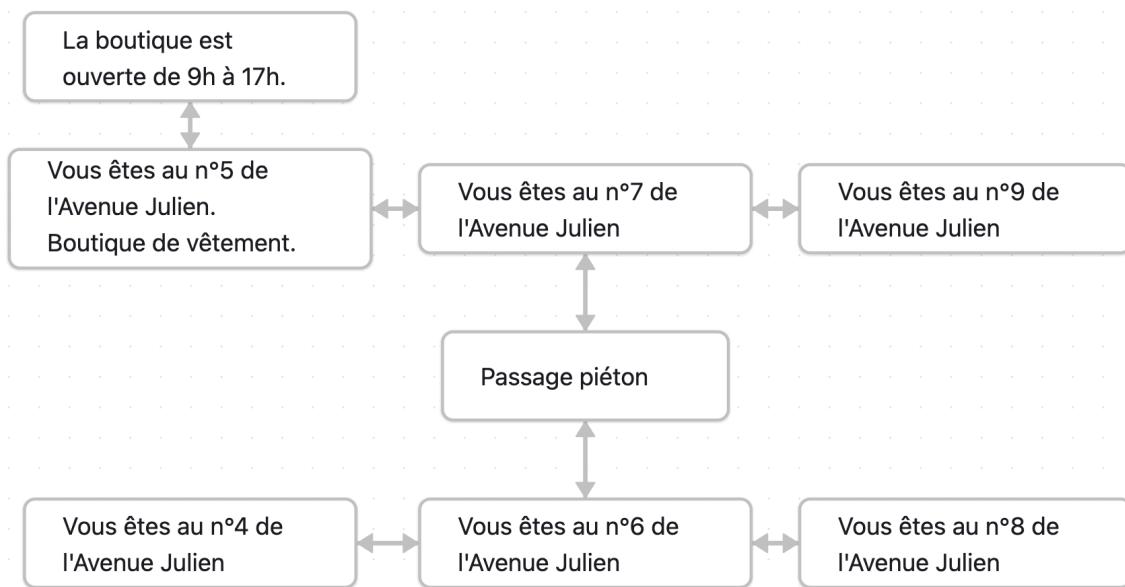


FIGURE 3.3 – Un graphe de texte permet de représenter un environnement topologique, ici une tronçon de rue. Plusieurs nœuds peuvent dériver d'une même entité géographique (ici une boutique dont les horaires sont indiqués sur un noeud voisin)

Chapitre 4

Expérimentations

Dans ce chapitre, nous allons présenter des expérimentations visant à appliquer à des cas d'usage concrets les méthodes présentées dans les chapitres précédents.

4.1 Du graphe OpenStreetMap à la description exocentrale

Cette partie présente une expérimentation visant à décrire textuellement un carrefour depuis OSM, en concevant la description au sein d'un SIG. Elle s'appuie, pour le déroulé général, sur le cadre présenté dans le chapitre 3 où les rôles de définition du besoin et de conception technique sont assumés par différents profils d'utilisateurs. Elle s'appuie également sur les modélisations du carrefour présenté en chapitre 2 pour l'acquisition des données.

4.1.1 Conception du canevas modulaire

À l'instar de ce que nous avons présenté au sein du chapitre précédent, la conception du canevas modulaire doit être prise en charge par l'utilisateur final de l'outil. Il doit ainsi préparer la forme des textes souhaités, la forme des données nécessaires, et définir sur cette base les patrons textuels à implémenter (3.1). Dans le cas de la description de carrefours, cette étape est assumée par l'IA, en collaboration avec la ou les personnes qu'il accompagne pour définir des descriptions adaptées à leur besoin.

4.1.1.1 Préparation du texte

Le texte préparé pour cette expérimentation est issu d'échanges avec des personnes liées à la déficience visuelle, notamment des personnes concernées, des IA, des architectes urbains et des entreprises de mobilité. L'objectif est ici d'obtenir un aperçu synthétique de la configuration du carrefour : sa forme, ses branches et les manières de le traverser. Pour décrire la forme du carrefour, bien que non-normalisé, un consensus à la fois mobilisé par les urbanistes et usagers existe autour des appellations « en croix », « en T », etc [Fog18], qui donne à la fois une information sur le nombre de branches et sur la forme générale du carrefour. Pour chaque branche, on détermine le nombre de voies, le type de véhicule qui circule dessus, et les sens de circulation. Enfin, on détermine pour chaque branche s'il existe une traversée, c'est-à-dire la possibilité de passer d'un trottoir à l'autre, et on décrit l'accessibilité des passages piéton qui y sont associés. Par ailleurs, toutes les descriptions

ont lieu dans le sens de sens des aiguilles d'une montre en partant de la branche la plus au nord. Le plan de la description est présenté sur la figure 4.1.



Description générale

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

Description des branches

(...)

La branche numéro deux qui s'appelle avenue Carnot est composée d'une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

(...)

Description des traversées

(...)

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

(...)

FIGURE 4.1 – Exemple de description souhaitée pour un carrefour en croix en suivant le plan établi. Source : IGN BD Ortho 2020.

4.1.1.2 Préparation de la forme des données

Pour générer le texte préparé, il faut disposer des données nécessaires à la description du carrefour. La conception du plan est divisée en trois parties pouvant chacune représenter une donnée :

La description générale présente une vue synthétique du carrefour : nom des branches et type de carrefour Une difficulté réside dans la variabilité du nombre de branches et de leur nom. Nous avons décidé ici de stocker les noms de branche au sein d'un unique champ dans le format JSON. La donnée peut alors suivre le schéma tabulaire défini en table 4.1.

Nombre branche	Noms branches
4	[{"type": "avenue", "name": "Carnot"}, {"type": "cours", "name": "Sablon"}]]

TABLE 4.1 – Le nom des branches est séparé en type et en nom afin de permettre la liaison lors de la réalisation du texte.

La description des branches doit indiquer pour chaque branche son numéro et, dans le sens des aiguilles d'une montre, les voies qui le composent. À l'instar des noms de branche, le nombre de voies est également variable. Par ailleurs, il doit être possible de décrire un enchaînement de voies de types et de sens différents. À l'instar de la solution

précédente, ces informations seront stockées dans une unique colonne au format JSON. On peut alors définir le schéma tabulaire en table 4.2.

N° branche	Voies
2	[{"number": 1,"direction": "sortante","type": "bus"}, {"number": 1,"direction": "entrante","type": "car"}]]

TABLE 4.2 – Le champ voie décrit l'enchainement des voies de la branche. Pour chaque couple de direction et de type, le nombre de voies contigües concernées est indiqué.

La description des traversées affiche une vue synthétique par branche de la traversée quand elle est présente. On ne décrit pas chaque passage piéton mais les caractéristiques générales de la traversées : nombre de passages piétons, présence intégrale, partielle, ou nulle de feux et de pavage tactile. Le schéma tabulaire est présenté en table 4.3.

N° branche	Nombre passages piéton	Feux piétons	Pavage tactile
3	2	complet	complet

TABLE 4.3 – Pour chaque branche, les caractéristiques de la traversée sont renseignées.

4.1.1.3 Préparation des patrons textuels

En disposant du texte final et de la forme des données, on peut maintenant définir les patrons textuels de chaque partie. Un patron textuel correspond à un texte conditionnel dont le contenu pourra varier selon les attributs de la donnée décrite. Un exemple de patron applicable à la description générale est présenté par l'algorithme 1.

```

entrées : NombreBranches : nombre de branches du carrefour
          NomsBranches : liste de noms de branches
sortie : Texte

texte ← "Le carrefour à l'intersection de"
pour chaque type, nom dans NomsBranches faire
|   texte ← texte + type + nom
fin
texte ← texte + "est un carrefour à" + NombreBranches + "branches".

```

Algorithme 1 : Patron textuel de la description générale

On remarque que le patron présenté ci-dessus ne correspond pas exactement au texte souhaité. Exécuté avec les données précédentes, le texte obtenu serait « Le carrefour à l'intersection avenue Carnot cours Sablon est un carrefour à 4 branches ». Il manque en effet les prépositions pour avenue et cours (« de l' » et « du »), de même qu'un « et » entre les deux noms de branche. Cet aspect est adressé dans l'implémentation présentée en partie suivante.

4.1.2 Intégration du canevas dans un SIG

L'intégration du canevas conçu par l'utilisateur est réalisée par un géomaticien ou une personne formée à l'utilisation d'un SIG. Cette intégration se fait en plusieurs étapes : il faut rechercher les données effectivement disponibles au regard des besoins exprimés, les transformer selon les formes établies par l'utilisateur, puis implémenter les patrons et la génération du texte final dans le SIG. Pour cette expérimentation, les traitements ont été réalisés sous QGIS. Des développements spécifiques en Python pour le traitement des données OSM liées au carrefour et pour la génération de texte ont été réalisé et sont présentés dans les parties suivantes.

4.1.2.1 Acquisition des données

Le texte préparé implique d'avoir accès à des données liées à la voirie à la fois des points de vue motorisé (nombre de voies) et piéton (trottoirs, passages piéton, signalisation), mais également à des informations sur l'accessibilité des équipements (BEV, signaux sonores). Comme évoqué dans le chapitre 1, ces informations sont accessibles au sein de bases de données éparses réalisées par les collectivités gestionnaires de la voirie et des équipements. Elles peuvent effectivement être utilisées, mais à condition de contraindre la réalisation des descriptions au territoire sur lesquelles elles sont disponibles. En revanche, les informations intrinsèques au carrefour (délimitation du carrefour et de ses branches) ne sont pas disponibles et doivent être calculées dans tous les cas. Nous avons développé des outils permettant d'obtenir ces informations à partir d'OSM.

Nous avons déjà présenté les méthodes mobilisées pour délimiter un carrefour et ses branches dans la partie 2.4. Ces méthodes ont été implémentées en Python au sein d'un outil nommé crseg et publié sous la forme d'un logiciel libre¹, qui permet, à partir du graphe de données issu d'OSM de délimiter les carrefours et, pour chaque carrefours, séparer son cœur de ses branches. Il présente plusieurs paramètres détaillés en partie 2.4 et sur la forge logicielle de l'outil. Il permet, en sortie, d'obtenir pour chaque région du carrefour (coeur du carrefour, branches, bordures) les nœuds correspondants au format JSON (voir figure 4.2).

Faisant suite à la délimitation du carrefour, nous présentons dans la partie 2.4.3 les méthodes permettant à partir des branches d'obtenir sur le carrefour les trottoirs, les îlots, et les traversées de branches. Ces méthodes ont également été implémentées en Python au sein d'un outil nommé crmodel et publié sous la forme d'un logiciel libre². crmodel prend en entrée le même graphe de données OSM utilisé par crseg, ainsi que le JSON de segmentation produit par crseg. Un exemple de résultat calculé par crmodel est présenté en figure 4.3.

crmodel comprend, au-delà de la création de ces nouvelles informations, une seconde étape : l'instanciation du modèle CrModel, présenté en partie 2.3. Celui-ci est prévu pour représenter un carrefour et intégrer au sein d'un modèle objets tous les éléments nécessaires à sa description, facilitant la manipulation des données. En partant du modèle, l'outil permet d'exporter un format GeoJSON spécifique pouvant être intégré dans un SIG et définissant pour chaque entité le type d'objet concerné (tronçon de route, branche, passage piéton, traversée) et les attributs associés.

1. <https://github.com/jmtrivial/crossroads-segmentation>

2. <https://github.com/jeremyk6/crmodel>

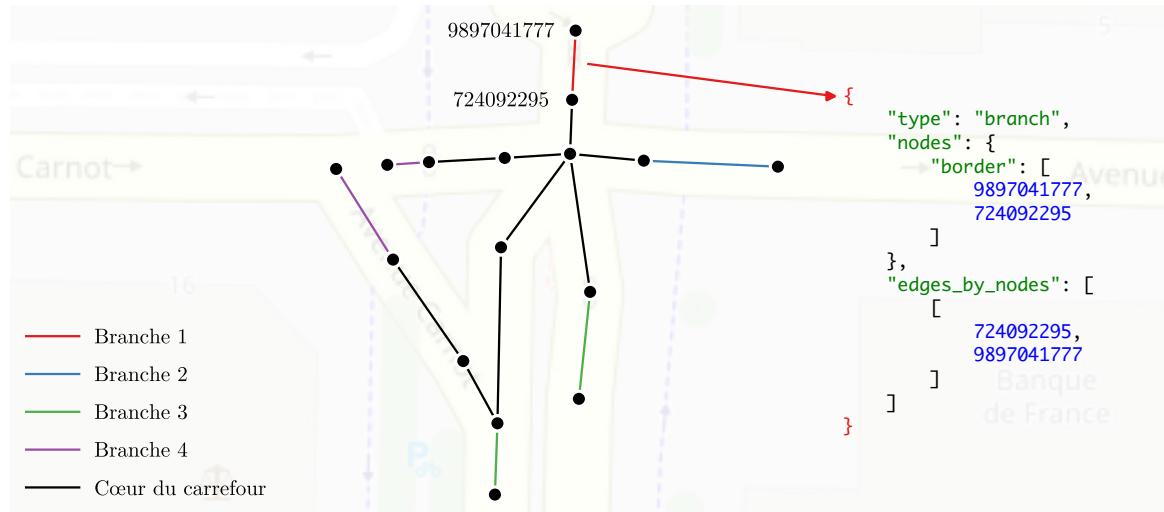


FIGURE 4.2 – Les données obtenues par crseg permettent d'identifier les nœuds appartenant à la branche. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

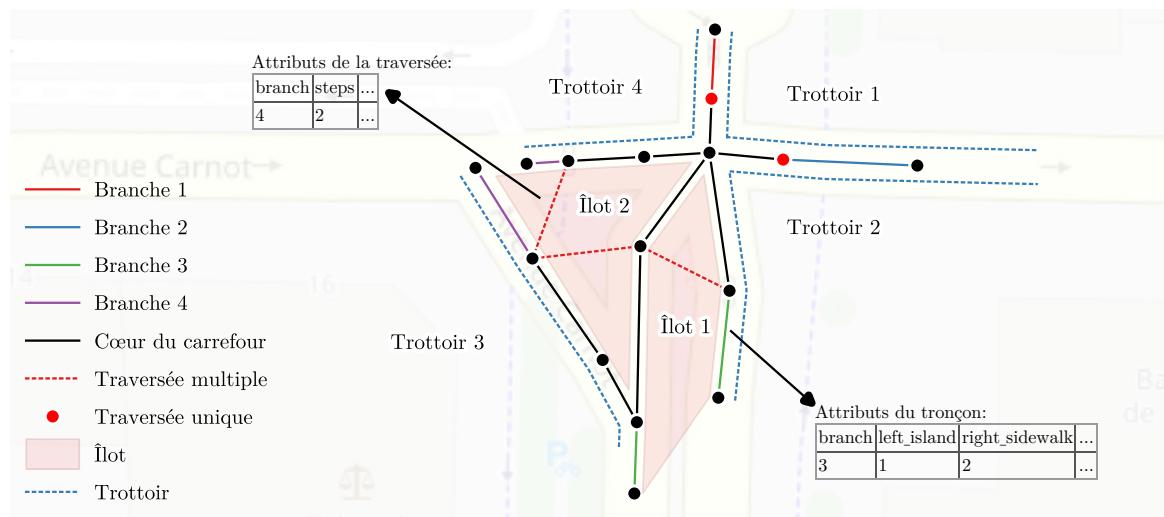
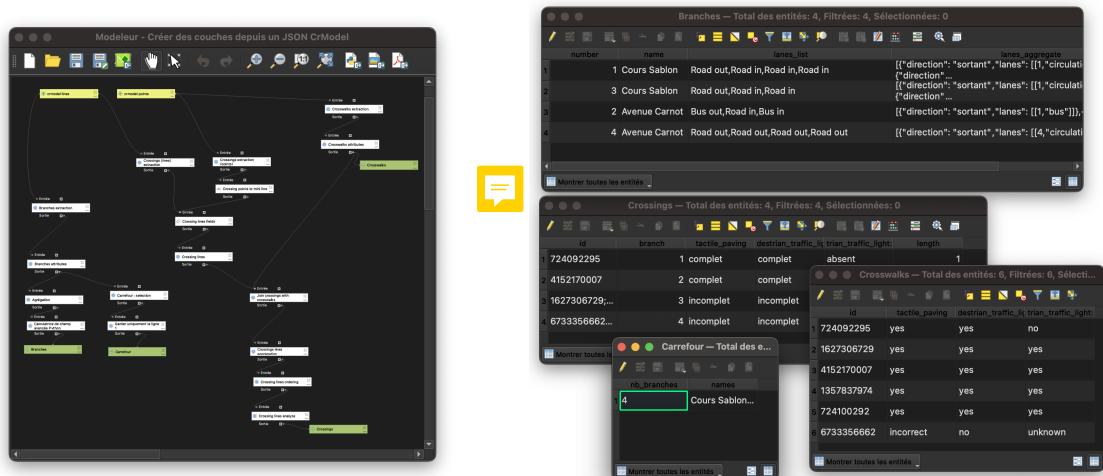


FIGURE 4.3 – Les informations piétonnes calculées à partir de crseg ne forment pas de nouvelle géométrie mais existent sous forme sémantique sur les tronçons originaux. Seules les traversées multiples forment de nouvelles géométries en étant composées des nœuds de passage piéton permettant de passer d'un trottoir à l'autre sur une branche. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

L'outil crmodel en ligne de commande embarque crseg et permet de visualiser le résultat de la segmentation avec la commande `crmodel -c x y` (`x` et `y` correspondant à la position approximative du centre du carrefour). Celle-ci peut être ajustée à l'aide des paramètres pour obtenir un résultat satisfaisant. On peut alors ajouter `-o carrefour.geojson` pour obtenir le fichier à intégrer à QGIS. Pour faciliter son utilisation par un utilisateur final, le géomaticien peut embarquer l'outil dans un traitement graphique exposant ses paramètres.

4.1.2.2 Transformation des données

Le format GeoJSON, pratique pour proposer un export rapide de l'intégralité des entités et attributs de CrModel, n'est pas rendu par QGIS d'une manière directement exploitable pour la génération de texte. Cependant, il contient l'intégralité des informations nécessaires à la génération du format de couches établies en partie 4.1.1.2. On peut alors exploiter les outils intégrés à QGIS pour transformer l'[export](#) dans le format attendu. Cette étape de transformation peut être réalisée manuellement ou intégrée à une chaîne de traitements Processing, l'outil de scripting graphique intégré à QGIS, pour automatiser toute transformation similaire ultérieure et appliquer la transformation sur d'autres territoires. La chaîne de transformation et le résultat obtenu sont illustrés en figure 4.4.



(a) Automatiser les traitements permet d'exécuter la chaîne sur de nouveaux territoires. (b) Les données transformées correspondent au format établi par l'utilisateur en partie 4.1.1.2.

FIGURE 4.4 – La chaîne de traitements de données sous QGIS permet de partir du GeoJSON fourni par crmodel pour obtenir un format exploitable pour la description.

4.1.2.3 Implémentation des patrons et de la description

Les données adaptées à la description en notre possession, nous pouvons maintenant implémenter les patrons de description puis leur assemblage sous QGIS. Pour le permettre, nous avons implémenté une extension à QGIS nommée QGIS2Desc, qui s'intègre à Processing pour proposer deux nouveaux traitements.

Le premier s'appelle « Concevoir une description » et va permettre l'implémentation d'un patron de description à partir d'une couche. Il prend en entrée une couche à décrire et offre à l'utilisateur un champ de texte permettant de définir le patron en Python. Plusieurs

facilitations sont proposées, notamment en permettant l'accès simplifié aux attributs de la couche. Par ailleurs, pour répondre à la problématique des prépositions soulevées en partie 4.1.1.3, il est possible d'utiliser le réalisateur de texte JSRealB [ML15] pour segmenter tout ou partie du texte en syntagmes et permettre la gestion des prépositions, des pluriels, des déterminants, des conjonctions, etc. Enfin, Il est possible d'ajouter au texte un ensemble de métadonnées qui permettront de le sélectionner lors de l'étape d'assemblage. En sortie du traitement, la couche d'origine est complétée de deux champs supplémentaires au format JSON :

- « description » contient le texte établi pour chaque ligne au format défini par JSRealB pour permettre sa réalisation ultérieure.
 - « metadata » contient les métadonnées définie précédemment.

La figure 4.5 est une capture d'écran qui montre l'usage du traitement pour obtenir la description générale du carrefour.

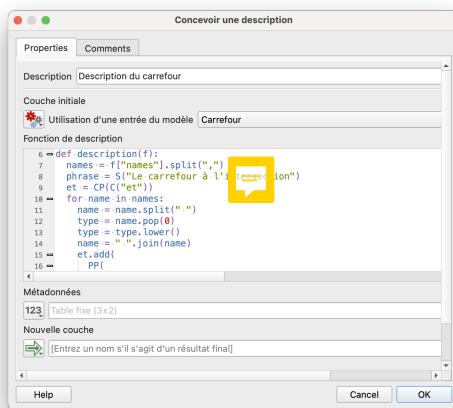


FIGURE 4.5 – Dans le patron, on remarque l'usage des fonctions CP et C qui vont permettre de réaliser la coordination entre les noms de branche. Pour deux branche, on obtiendra le texte « branche 1 et branche 2 ». Pour trois branches et plus, on obtiendra le texte « branche 1, branche 2, branche 3, (...) et branche n »

Le second s'appelle « Assembler des descriptions » et va permettre de générer le document final. Il prend en entrée plusieurs couches issues de « Concevoir une description », un ensemble de métadonnées correspondantes à celles définies à l'étape précédente et qui va permettre de sélectionner les descriptions à prendre en compte, et un plan de description. Le plan de description correspond à un tableau ordonné dont le format est indiqué par le tableau 4.4. Chaque entrée du tableau est prise en compte de haut en bas et définit la couche décrite, le titre de la partie, et la forme que prendra le texte (actuellement un texte brut et une liste simple ou numérotée). La figure 4.6 présente un exemple d'assemblage de la description.

À l'instar des traitements de données, il est possible d'intégrer les patrons et l'assemblage dans un traitement Processing pour permettre sa réutilisation sur de nouvelles données. Un modèle graphique Processing devient sous QGIS un traitement comme un autre avec des entrées, des sorties, et des paramètres. Il est ainsi possible d'exposer les paramètres de l'assemblage comme les métadonnées à sélectionner ou le plan de la description afin de permettre à un utilisateur final de moduler la description obtenue. La figure 4.7 illustre un exemple de modèle graphique permettant la description du carrefour.

Couche	Titre	Forme
general	Description générale	text
branches	Description des branches	numbered_list
crossings	Description des traversées	numbered_list

TABLE 4.4 – Le plan de la description défini précédemment serait le suivant dans le traitement établi.



(a) La fenêtre de « Assembler les descriptions » présente ses différents paramètres. (b) La sortie HTML obtenue respecte le formatage défini dans le plan.

FIGURE 4.6 – Le traitement actuel permet d'obtenir en sortie un document HTML, mais son code est cependant extensible pour permettre la génération d'autres types de documents.

4.1.3 Utilisation des outils pour générer une description

Les outils en place, l'utilisateur final (l'IA) va pouvoir générer des descriptions sur plusieurs territoires. Pour cela il doit suivre les étapes suivantes :

1. Utiliser crmodel pour obtenir les données intrinsèques du carrefour, les données piétonnes, et les attributs d'accessibilité. Comme évoqué précédemment, le géométricien peut avoir préparé une boîte à outil pour l'utiliser de manière graphique.
2. Exécuter le premier traitement préparé le géométricien pour transformer les données de crmodel en couche prêtes pour la description (figure 4.4).
3. Exécuter le second traitement pour obtenir la description finale. Il est possible de personnaliser le résultat en sélectionnant les patrons préparés, et en ajustant la présence et la forme des parties.

L'intégralité du processus réalisé par l'utilisateur final est illustré en figure 4.8.

4.1.4 Des interfaces pour accéder aux descriptions

En parallèle des outils implémentés sous QGIS, nous avons proposé une seconde interface dans un environnement web qui implémente le plan de description esquissé en figure 4.1. Les traitements sont réalisés intégralement côté serveur. Lors du clic sur un carrefour, la position est envoyée au serveur qui télécharge les données OSM autour du point, segmente le carrefour le plus proche avec crseg, exécute crmodel, et réalise la description en Python de la même manière que sous QGIS. Le serveur renvoie alors au client le GeoJSON du carrefour pour afficher le résultat de la segmentation, ainsi que la description. Il est également possible côté client de personnaliser les paramètres de crseg pour moduler la

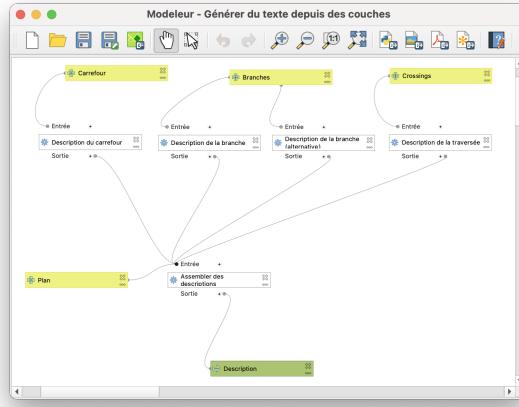


FIGURE 4.7 – Le modèle graphique contient les patrons de plusieurs couches. On remarque également plusieurs patrons pour une même couche. Ceux-ci pourront être sélectionnés à l'aide des métadonnées lors de l'étape d'assemblage pour personnaliser la description.

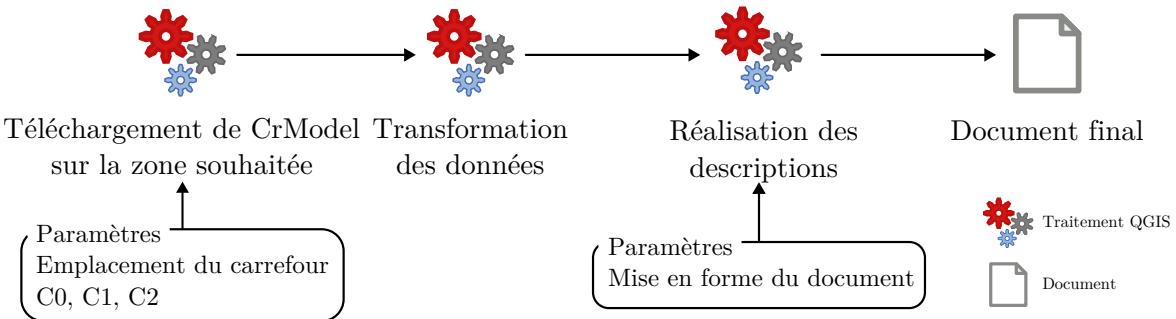


FIGURE 4.8 – L'exécution de la chaîne complète est simplifiée par les outils réalisés en amont par le géométricien. Les complexités des traitements de données et de la réalisation du texte sont masquées derrière des boîtes à outils dont la prise en main est facilitée.

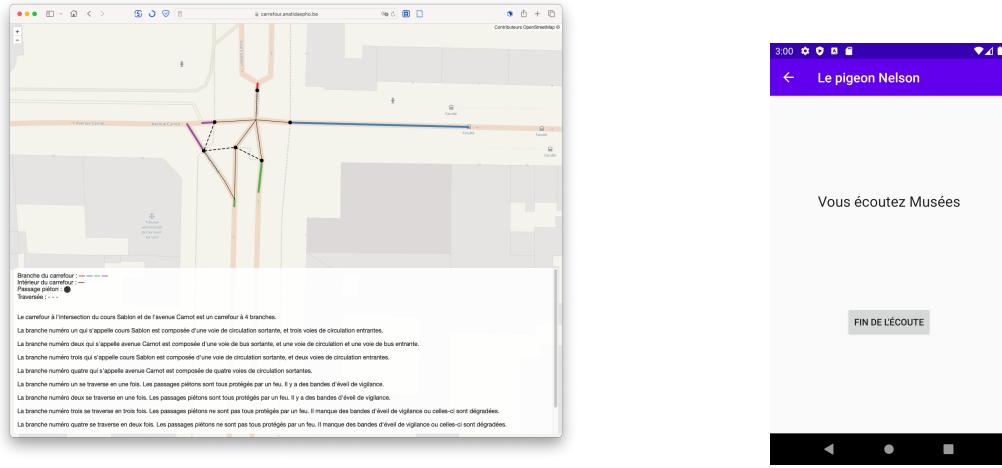
segmentation du carrefour. Une capture d'écran de l'outil est présentée en figure 4.9a. Par ailleurs, l'outil est accessible en ligne³ et son code source l'est également⁴.

Par ailleurs, le serveur permet également de renvoyer les données au format attendu par l'application « Le Pigeon Nelson ». Le Pigeon Nelson est une application libre pour smartphone⁵ qui permet de jouer un son relatif à la position de l'utilisateur et aux valeurs des capteurs du téléphone. Il fonctionne en mode client-serveur et la majorité de la logique se trouve côté serveur (se référer à la documentation pour plus de détails). Lors d'une requête vers le serveur CrWeb, l'application envoie sa position GPS. Le pipeline tel que décrit précédemment est alors exécuté sur la position envoyée avec les paramètres par défaut de crseg, et le serveur renvoie un fichier JSON adapté contenant le texte généré pour le carrefour le plus proche. Ce JSON est interprété par l'application, qui lit la description obtenue par synthèse vocale. Une capture de l'application en cours d'utilisation est présentée en figure 4.9b.

3. <https://carrefour.anatidaeph.be>

4. <https://github.com/jeremyk6/crweb>

5. <https://github.com/Le-Pigeon-Nelson/le-pigeon-nelson>



- (a) CrWeb permet d'afficher la segmentation du carrefour et le résultat de la description pour un patron figé.
- (b) L'application lors de l'échange avec le serveur n'affiche aucune information. Ici, le son joué correspond au texte affiché par la figure de gauche.

FIGURE 4.9 – Deux exemples d'interfaces permettant d'afficher ou d'écouter les descriptions générées à l'aide des outils présentés.

4.2 Des descriptions textuelles intégrées à une carte tactile

Le projet ACTIVmap, dans lequel s'inscrit cette thèse, est porté par trois acteurs : le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS), l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et l'Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT). La collaboration entre ces trois entités s'est cristallisée sous la forme de preuves de concepts dont l'objectif est de présenter une chaîne partant de la donnée pour réaliser une carte audiotactile. Dans cette partie, nous présentons deux preuves de concept réalisées dans ce cadre.

4.2.1 Preuve de concept 1 : réaliser une carte audiotactile

Document En Relief Interactif (DERi) [Bro12] est une application développée au sein de l'IRIT. Elle permet de transformer une tablette tactile en support tactile interactif. Son fonctionnement est le suivant : au sein de l'application est ouvert un fichier spécifique qui définit sur l'écran des interacteurs qui à l'appui déclenchent un son enregistré ou synthétisé. Plusieurs types d'appui sont pris en compte (simple appui, double appui), et il est possible sur un interacteur de déclencher des sons différents selon le type d'appui. Un document tactile correspondant au fichier et imprimé sur papier thermogonflé estposé sur l'écran et maintenu par la coque. L'épaisseur du papier permet aux interactions d'être détectée par l'écran tactile et de jouer les sons déclenchés par l'utilisateur lors de l'appui sur un interacteur. La figure 4.10 présente le dispositif.

DERi peut être utilisé pour réaliser toute sorte de documents audiotactiles, dont des cartes pour prendre connaissance d'un lieu. En revanche, ces réalisations à l'instar de celles des IA sont aujourd'hui manuelles. L'objectif de cette expérimentation est de permettre la génération d'une carte audiotactile de carrefour sous la forme d'un fichier DERi. La chaîne

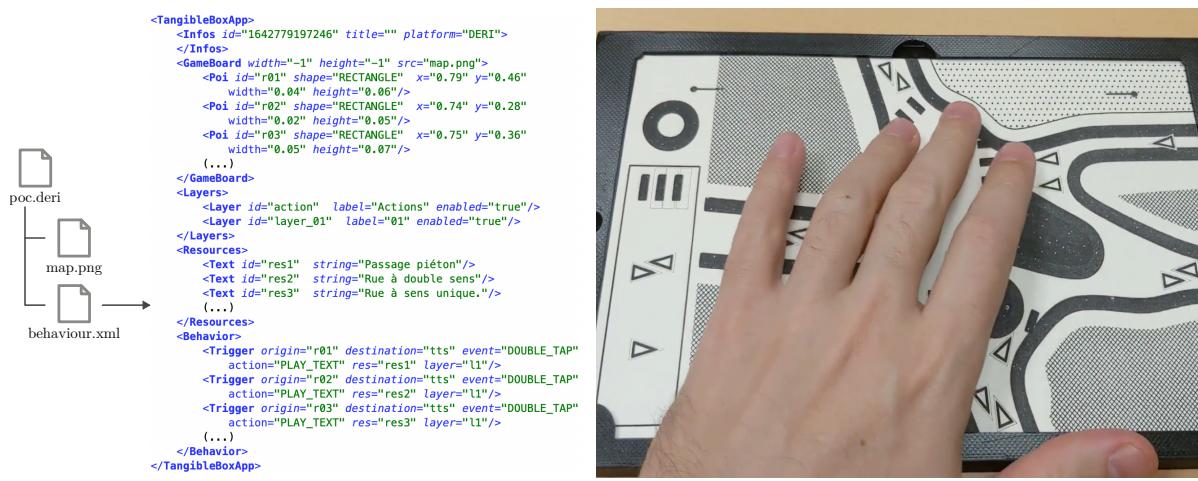


FIGURE 4.10 – À gauche, contenu d'un fichier .deri et extrait du fichier XML d'interaction pour la légende de la carte de droite. On remarque que sont définis séparément les interacteurs (Poi) et les textes à jouer (Text), liés ensemble par une interaction (Trigger). À droite, une tablette DERi assemblée et en cours d'utilisation. Source : preuve de concept ACTIVmap.

permettant d'obtenir le document final combine les descriptions développées au LIMOS et les cartes tactiles développées à l'IGN.

4.2.1.1 Assembler la carte et les descriptions

Dans la partie 4.1, nous avons présenté un cadre et les outils permettant de proposer une description textuelle de toute donnée géographique. Par ailleurs, nous avons proposé des outils permettant à partir des données OSM d'obtenir des informations intrinsèques au carrefour comme la délimitation des branches. Tous ces outils peuvent être intégrés au SIG QGIS pour décrire textuellement un carrefour. Les travaux de JIANG et al. [Jia23b] s'intéressent à la génération de cartes tactiles à l'échelle du carrefour, en partant également des données d'OSM. Les processus transforment les géométries et stylisent les données pour les adapter aux contraintes de lisibilité d'une carte tactile imprimée sur du papier thermogonflé. Ces processus s'intègrent également à QGIS.

La réalisation d'une carte audiotactile à partir des travaux cités soulève les questions suivantes :

— Quels éléments décrire ?

Le choix des éléments à décrire dépendra de la taille et de l'usage de la carte (voir les exemples présentés en partie 4.2.1.3). Les outils présentés en partie 4.1, en particulier les traitements intégrés à QGIS2Desc, permettent d'étendre les possibilités de description à des données non-intégrées à crmodel aujourd'hui. Outre l'accessibilité, il est alors possible de décrire d'autres points d'intérêts pouvant servir de repère tels que les commerces ou les arrêts de bus.

— Où et comment placer les interacteurs pour maintenir la lisibilité de la carte ?

Les sons joués par DERi sont déclenchés par des interacteurs. Les interacteurs sont intégrés à une couche indépendante des données géographiques à décrire. Par exemple, l'interacteur permettant de décrire un passage piéton peut être placé à

côté de celui-ci et non-pas sur le symbole représentant le passage piéton pour ne pas gêner sa lisibilité. Une grande densité d'interacteurs peut également poser des problèmes de lisibilité, et il est alors souhaitable de les fusionner. Le placement des interacteur est un problème qui n'a aujourd'hui pas encore été abordé et fait partie des perspectives évoquées par JIANG et al. [Jia23b]. Leur placement est ici défini à la main.

— Comment définir le texte d'un interacteur ?

En partant des mêmes données pour la carte et pour le texte, il existe un identifiant commun issu d'OSM pour chaque entité permettant d'effectuer une correspondance automatique. Cependant, certaines descriptions n'ont pas d'accroche sous la forme d'un objet issu d'OSM. Il peut s'agir par exemple de la description générale du carrefour, ou des description de branches. L'identifiant permettant de faire la correspondance avec le texte doit alors être décidé en amont pour être commun aux deux données. 

Une illustration de la chaîne de traitement partant des données jusqu'au lien entre le texte généré et la carte tactile est présentée en figure 4.11.

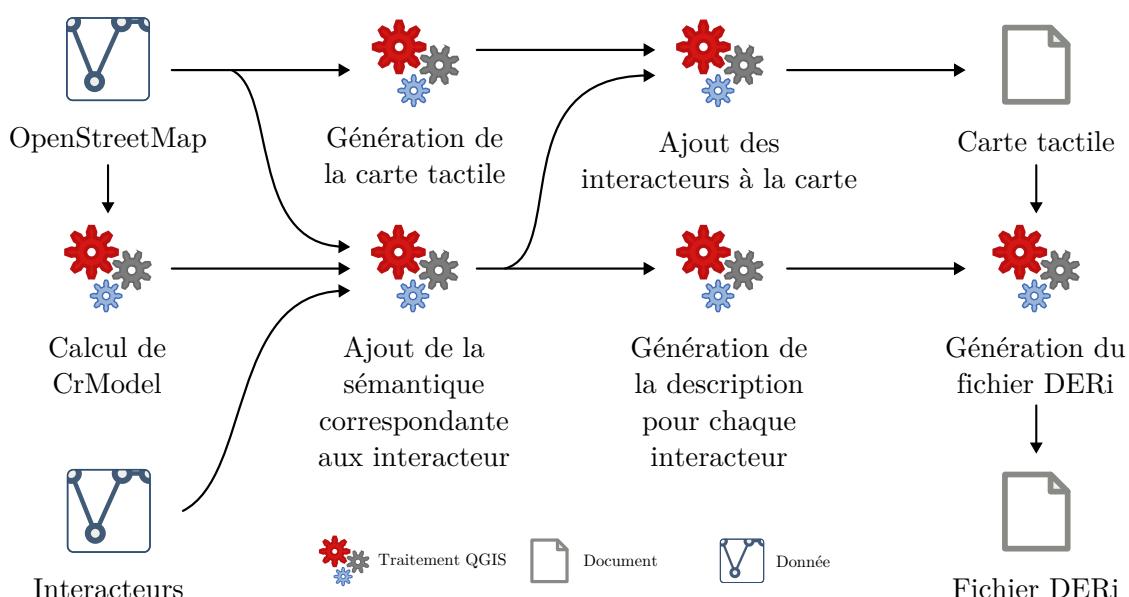


FIGURE 4.11 – Cette chaîne présente la méthode choisie pour définir le texte des interacteurs de la carte tactile en fonction des objets qu'ils représentent. Ce lien est fait en utilisant l'idenfiant OSM commun au texte et à la carte.

4.2.1.2 Générer un fichier DERi

À partir du fichier du fichier des interacteurs décrits et de la carte, il est possible de générer un fichier DERi, mais une transformation de la forme et des coordonnées doit être effectuée. Un fichier DERi correspond à un fichier zip contenant la carte dans un format image pour un affichage à l'écran (pour tester les interactions) et un fichier XML définissant les interactions. Ce dernier est séparé en trois parties principales : définition de la position et de la forme des interacteurs, définition des ressources (textes à lire ou fichiers

audio), et définition pour chaque interacteur de la ressource jouée pour une interaction donnée (simple appui, double appui, etc.) (voir figure 4.10).

DERi étant un système permettant la réalisation de tout document tactile, donc pas spécialement des cartes, la position et la forme des interacteurs est exprimée en pourcentage de taille d'écran, avec une origine en haut à gauche. Pour calculer la position dans ce format (x_{deri} et y_{deri}) de chaque interacteur, il est donc nécessaire de connaître la position de chaque interacteur (x et y) et l'étendue de la carte (x_{min} , x_{max} , y_{min} et y_{max}) :

$$x_{deri} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

$$y_{deri} = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}}$$

Le processus de transformation, à l'instar des précédents, peut être automatisé dans un SIG comme QGIS pour obtenir le document final.

4.2.1.3 Exemples de cartes audiotactiles générées

Les méthodes présentées dans cette partie ont été appliquées à la génération de cartes audiotactiles de différentes tailles et répondant à différents usages. La figure 4.12 présente quelques exemples de résultats.

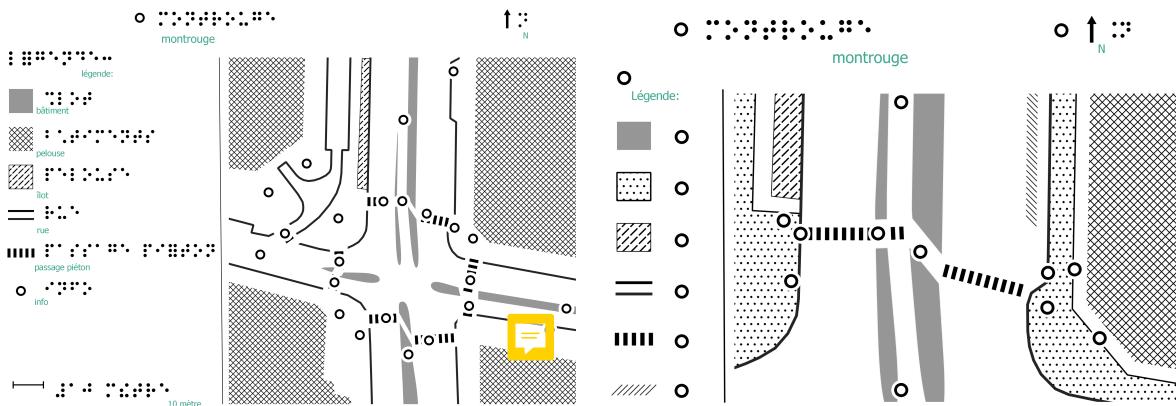


FIGURE 4.12 – Deux cartes audiotactiles réalisées par Markie Jiang [Jia23a] dans le cadre du projet. La différence de taille entre les deux cartes (A4 à gauche, A5 à droite) s'explique par la différence d'usage. La première est pensée pour être utilisée chez soi ou en séance de locomotion. La seconde est plutôt prévue pour un usage sur site.

4.2.2 Preuve de concept 2 : interactions à partir de données graphique

Dans l'expérimentation précédente, nous avons proposé les méthodes permettant de générer une carte audiotactile pour DERi à partir d'une carte et de données géographiques décrites. Dans sa version actuelle, DERi permet de définir un son par interaction et par interacteur. Cela correspond bien à un usage exploratoire de la carte, mais cela limite la quantité d'information que l'on peut faire figurer. Par exemple, en fonction de l'échelle de la carte il n'est pas possible de faire figurer tous les services (commerces, banques, bureaux de postes, etc) d'une branche pour des contraintes de lisibilité, la densité des interacteurs

nécessaires pouvant être trop importante ou le texte trop long si présent sur un seul interacteur. Par ailleurs, il pourrait être souhaitable de décrire la branche au-delà de ce que la carte affiche. Pour répondre à cette problématique dont l'objectif est de réfléchir à de nouveaux usages, l'IRIT propose de faire figurer des informations multiples sur un seul interacteur sous la forme d'un graphe de texte navigable par glissement du doigt, à l'instar de la navigation actuellement implémentée sur les smartphones. Nous avons proposé ensemble une nouvelle version du format de fichier DERi permettant d'implémenter un graphe de texte au sein d'un unique interacteur. Le fonctionnement de ce nouveau format et son application possible à la navigation virtuelle au sein d'une branche sont détaillées dans cette partie.

4.2.2.1 DERi 2 : un nouveau format pour naviguer dans un graphe de textes

À l'instar de la première version, un fichier DERi 2 est également un fichier zip contenant une image du document et un fichier d'interaction. Ce dernier est maintenant au format JSON et comprend les mêmes sections que précédemment. La différence majeure se situe dans la capacité des ressources à être liées à d'autres ressources en fonction d'une nouvelle interaction. En déclenchant depuis un interacteur une ressource donnée, un curseur virtuel est placé sur cette ressource. Une nouvelle interaction réalisée sur le même interacteur pourra déplacer ce curseur vers une nouvelle ressource. Les ressources forment ainsi un graphe au sein duquel il est possible de naviguer par interaction. Outre les appuis, les glisser dans les quatres directions ont été introduits pour permettre la navigation dans le graphe. La figure 4.13 illustre le fonctionnement de ce nouveau format.

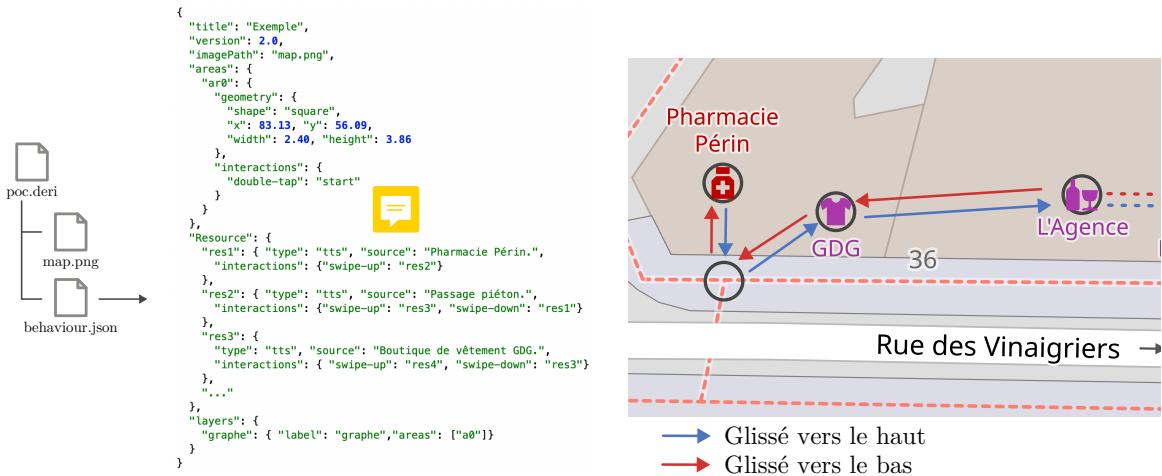


FIGURE 4.13 – Le fichier JSON d'interaction décrit un graphe de texte navigable par interaction. La carte de droite illustre le passage d'un texte à un autre selon l'interaction réalisée. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

Cette nouvelle représentation sous forme de graphe permet de spatialiser les descriptions, avec une notion d'avant et d'après. Dans cette expérimentation, nous avons choisi d'appliquer ce nouveau format à la description interactive d'une branche, et en particulier de ses commerces et services. L'objectif est ici de pouvoir naviguer depuis le début de la branche de commerce en commerce, et d'entrer virtuellement à l'intérieur de ceux-ci pour obtenir des informations supplémentaires sur chacun d'eux.

4.2.2.2 Traitement des données pour la génération du graphe

À l'instar de la première preuve de concept, les données mobilisées seront issues de crmodel pour les informations du carrefour, complétées d'OSM pour les commerces. Pour réaliser ces textes, il est nécessaire de concevoir un graphe par branche. Ce graphe sera réalisé de la manière suivante :

- Pour chaque branche, on estime quels commerces se situent sur son trottoir de droite et sur son trottoir de gauche.
- Un graphe de proximité des commerces par trottoir est réalisé. Chaque noeud permettra d'indiquer le nom et l'adresse du commerce.
- Un noeud supplémentaire est ajouté par commerce. Il est relié au noeud du commerce concerné et permet d'indiquer des informations supplémentaires telles que les horaires d'ouverture et les services proposés.
- Aux graphe de proximité des commerces sont insérés les noeuds des passages piétons présents sur la branches. Leurs deux extrémités permettent de naviguer d'un trottoir à l'autre.

La construction de ce graphe peut être automatisée sous QGIS et présentée à l'utilisateur sous la forme d'une boîte de traitement. Un exemple de graphe pour une branche est présenté en figure 4.14.

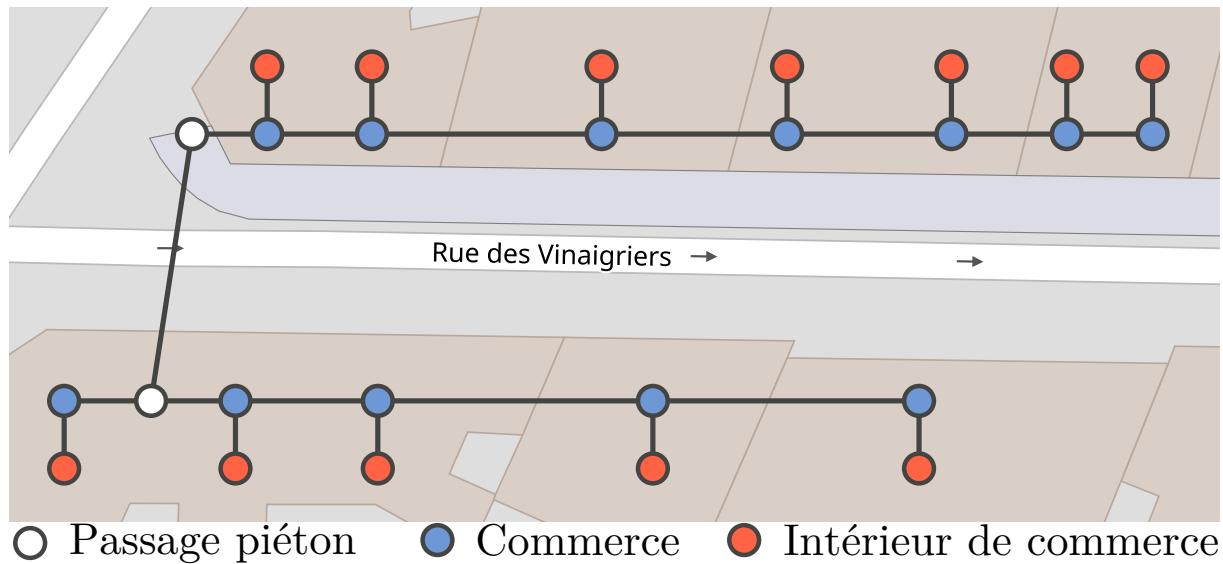


FIGURE 4.14 – Exemple de graphe généré pour une branche. Seules la topologie et la sémantique comptent pour la navigation, la géométrie présentée dans cette exemple est factice pour être lisible. Source : Contributeurs OpenStreetMap.

L'implémentation des patrons textuels est ensuite réalisée avec QGIS2Desc pour chaque type de noeud du graphe (commerce, passage piéton, etc).

4.2.2.3 Construction du fichier DERi 2

La construction du fichier DERi 2 est similaire au processus présenté en partie 4.2.1.2. En entrée du processus de création, on retrouve la carte et le fichier d'interacteurs, cette fois-ci complétés des couches représentant les graphes de chaque branche tels que décrits précédemment. Les interacteurs sont toujours placés manuellement et chacun référence un graphe, ce dernier contenant le texte.

Les interactions sont définies de la manière suivante : lors d'un double appui sur l'interacteur, la première ressource appelée correspond au premier noeud du trottoir gauche de la branche. Un glissement vers le haut ou le bas permet de naviguer de commerces en commerces le long de la branche. Sur le trottoir gauche, lors d'un glissement vers la gauche, on accède au noeud supplémentaire du commerce, et inversement pour le trottoir de droite. De la même manière, sur le trottoir de gauche, en étant positionné sur un noeud de passage piéton, un glissement vers la droite permet de changer de trottoir, et inversement pour le trottoir de droite.

4.2.2.4 Exemple de carte audiotactile générée

Les méthodes détaillées ci-dessus n'ont pas été automatisée mais appliquée manuellement pour réaliser une branche sur le carrefour du Pont des Demoiselles de Toulouse présenté en partie 4.2.1.3. Ce dernier a été choisi car plusieurs cartes tactiles avaient déjà été réalisées pour ce carrefour. La figure 4.15 illustre le graphe obtenu pour la branche visée et une partie du texte associé.

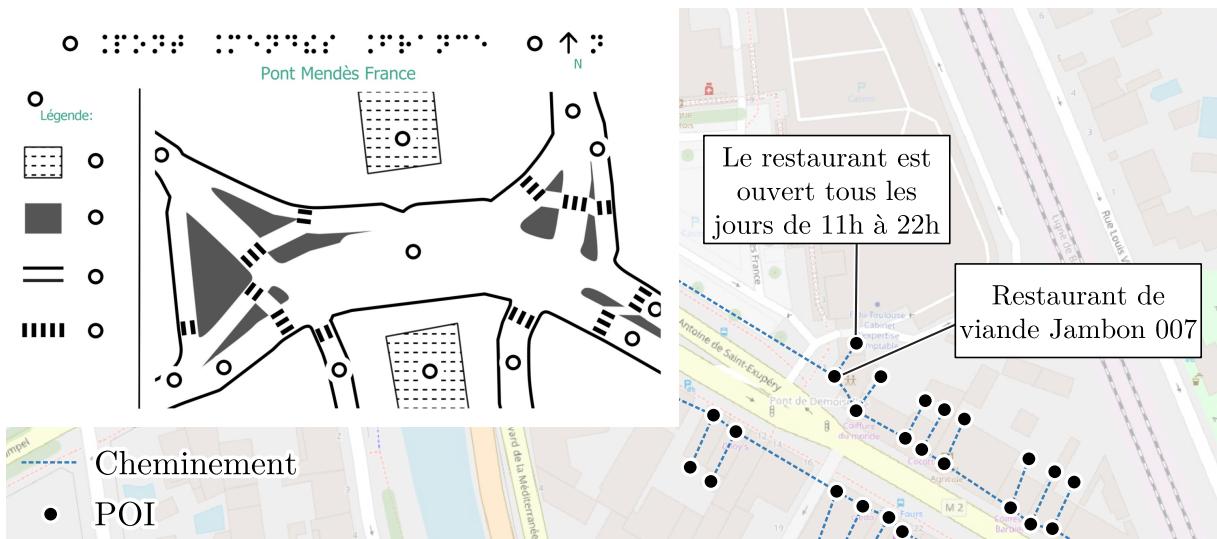


FIGURE 4.15 – La carte tactile en version A5 limitant la représentation des branches, le graphe permet de naviguer au-delà pour prendre connaissance des commerces qu'elle peut contenir.

4.3 Le carrefour dont vous êtes le héros : naviguer dans une description égocentré

La navigation dans un graphe de texte a été explorée dans la partie précédente en mobilisant les nouvelles fonctions permises par DERi 2. Cette dernière repose d'une part sur les interactions avec une carte, et d'autre part sur un texte forcément exocentré où chaque noeud contient un texte indépendant du contexte. Dans cette partie, en se détachant du medium tactile, nous proposons une expérimentation permettant de naviguer dans un graphe de texte sous la forme d'une description égocentré. L'objectif est de permettre à l'utilisateur de naviguer dans une description textuelle d'un carrefour en se déplaçant virtuellement à l'intérieur de celui-ci.

4.3.1 Texte souhaité et forme des données

La particularité de la description égocentrale au regard des précédentes concerne la forme du texte, qui sera présenté de manière orientée et à la première personne. Il peut s'agir par exemple de la description du déplacement à effectuer pour se rendre sur un passage piéton : « Tourner légèrement à gauche pour trouver le prochain passage piéton ». La réalisation d'une description de ce type implique de disposer d'un graphe de données et d'une information textuelle adaptée. Un exemple de graphe et de textes souhaités pour décrire une partie d'un cheminement est présenté en figure 4.16.



FIGURE 4.16 – Exemple de descriptions égocentrées passant sur le même passage piéton. On remarque que la description est contextualisée par rapport à l'endroit d'où l'utilisateur provient. Un élément n'est ainsi pas toujours décrit par le même texte. Source : IGN BD Ortho 2020.

Une problématique de la description égocentrale concerne les angles et les distances. Les PCDV ont une capacité de discrimination angulaire et d'estimation des distances très dépendante des conditions de l'environnement [RC19]. Sur ces aspects, nous pouvons choisir de laisser l'indication floue pour ne pas induire en erreur l'utilisateur, par exemple en indiquant « Tourner légèrement à gauche » plutôt que « Tourner à 45 degrés à gauche ». Par ailleurs, les données mobilisées seront de toutes façons trop imprécises pour permettre un haut niveau de détail dans les descriptions métriques.

La manière de naviguer textuellement dans le carrefour que nous proposons est inspirée des livres-jeux tels que les « Livres dont vous êtes le héros », où le lecteur est amené à faire des choix pour avancer dans l'histoire, les chapitres constituant un graphe de texte. Dans notre cas, une subtilité provient de la nécessité de conserver l'information de la provenance, pour indiquer notamment l'orientation et fournir des informations telles que « Continuez tout droit » ou « Tournez à gauche ». Les liens entre les noeuds seront ainsi modélisés de la manière suivante : pour chaque noeud n du graphe, on a une liste qui associe à chaque noeud voisin n_{source} une liste qui associe à chaque noeud voisin n_{cible} une question et un texte correspondant si celle-ci est sélectionnée. Pour le graphe en figure 4.16, on obtiendrait en étant positionné sur le noeud $n2$:

- Depuis $n1$
- Vers $n1$
 - Question : « Faire demi-tour »
 - Texte : « Faites demi-tour et continuez sur le trottoir gauche de la branche 2 »
- Vers $n3$
 - Question : « Aller en direction du trottoir opposé. »
 - Texte : « Tournez à gauche pour accéder au passage piéton. Vous pouvez le

- repérer à l'aide de la bande d'éveil de vigilance. »
- Vers *n4*
- ...
- Depuis *n3*
- ...

Cette information peut être matérialisée sous la forme d'un tableau de donnée dont un extrait est proposé en table 4.5.

Nœud courant	Depuis	Vers	Question	Texte
2	1	1	« Faire demi-tour »	« Faites demi-tour et continuez sur le trottoir gauche de la branche 2 »
2	1	3	« Aller en direction du trottoir opposé. »	« Tournez à gauche pour accéder au passage piéton. Vous pouvez le repérer à l'aide de la bande d'éveil de vigilance. »

TABLE 4.5 – Pour matérialiser les listes imbriquées précédentes, une ligne correspond pour un noeud à une source et une destination. Ainsi, si un noeud a trois voisins, il sera représenté par trois lignes par voisin, soit neuf lignes.

4.3.2 Obtention du graphe et génération des informations textuelles

Un graphe piéton d'une telle précision, contenant les trottoirs et les passages piéton sous forme linéaire, n'est pas disponible sur tous les territoires. Sur OSM, en France, peu de villes en disposent mais l'on peut citer notamment Paris ou Orange. Ce sont ces données qui seront mobilisables pour l'expérimentation.

L'obtention du graphe est ainsi très directe depuis OpenStreetMap. Il est simplifié pour ne conserver qu'une arête entre les points d'intérêts à considérer. crmodel ne délimitant le carrefour que sur le réseau routier, il est possible de l'utiliser pour découper à chaque branche le trottoir sur l'arête adjacente, ou délimiter le carrefour manuellement. Cette seconde solution est ici choisie, notamment pour créer manuellement les noeuds correspondants à la direction à l'extrémité de chaque trottoir.

Pour chaque noeud du graphe, les noeuds voisins sont repérés pour reconstituer la table 4.5. Enfin, les textes correspondants aux questions et aux textes peuvent être générés à l'aide de QGIS2Desc en mobilisant les informations contenues dans les points d'intérêt et dans les arêtes les reliant. Pour indiquer dans le texte la direction correspondante, l'algorithme suivant peut être appliqué : pour chaque noeud de direction, on regarde si le chemin le plus court de notre position vers celui-ci implique de passer par le noeud de destination. Si oui, on indique que le cheminement pointe dans cette direction. De cette manière, un cheminement peut mener à plusieurs directions. Cet algorithme peut être empaqueté dans une fonction pour faciliter son usage lors de la conception du patron.

4.3.3 Implémentation au sein d'une application web

Sur la base des données préparées en partie précédente, il serait possible de générer un fichier ad hoc utilisable un interpréteur pour naviguer dans le carrefour à la manière d'une fiction HTML. En réalité, l'implémentation de cette expérimentation prédate le modèle



présenté en partie 4.1. Ici, la description est générée automatiquement à partir d'un graphe dessiné à la main sur QGIS et contenant les informations souhaitées. Ce graphe est ensuite exporté dans un format XML propre à l'implémentation et interprété par une application web. Quatre carrefours ont été réalisés de cette manière et sont accessibles en ligne⁶. Le code source également disponible sous licence libre⁷. Une capture de l'application réalisée est proposée en figure 4.17.



FIGURE 4.17 – L'application web permet de naviguer dans un carrefour à la manière d'un livre dont vous êtes le héros.

4.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes expérimentations réalisées dans le cadre de cette thèse, couvrant la réalisation de description de types et de supports variés.

Nous avons présenté les implémentations des méthodes présentées aux chapitres 2 et 3 sous la forme d'outils mobilisables dans un SIG comme QGIS. Nous avons esquissé, en mobilisant ces méthodes et outils, la faisabilité de la génération de descriptions exocentriques indépendantes ou intégrées à une carte audiotactiles dans le cadre de travaux communs avec les autres membres du projet ACTIVmap. Nous avons également proposé une nouvelle manière de naviguer dans une description textuelle de carrefour sous la forme d'une description égocentrique.

Les textes, méthodes, et outils présentés dans ce chapitre doivent être évaluées pour en mesurer la qualité et l'efficacité. Il s'agit de l'objet du chapitre suivant.

6. <https://carrefours.activmap.limos.fr>

7. <https://gitlab.limos.fr/jeremyk6/carrefourV2>

Chapitre 5

Évaluation

Ce chapitre d'évaluation s'intéresse à la qualité des méthodes de segmentation et de modélisation de carrefours présentées dans les chapitres 2 et 4. Nous commençons par évaluer les implémentations de ces méthodes. Puis, nous évaluons le canevas de description de carrefours en confrontant les descriptions générées par notre chaîne à l'expertise des professionnels de la déficience visuelle. Enfin, nous évaluons la capacité de notre canevas à intégrer les modifications proposées par ces professionnels.

5.1 Évaluation ~~des implémentations~~

Dans le chapitre 4, nous avons présenté les implémentations des méthodes de segmentation et de description de carrefours du chapitre 2. Ces deux outils, crseg et crmodel, sont évalués dans cette partie pour mesurer leur efficacité et leur précision.

Nous avons développé un outil d'évaluation aléatoire qui nous permet de comparer les résultats de notre algorithme avec l'œil d'un expert. L'outil permet à l'utilisateur de charger le résultat calculé sur une zone d'intérêt fixe, et propose ensuite d'évaluer dans un ordre aléatoire les carrefours traités. L'interface d'évaluation (figure 5.1) est composée de deux panneaux : à gauche, un formulaire simple permet à l'utilisateur d'indiquer en quelques clics les défauts éventuels du résultat, et à droite le carrefour est représenté par un ensemble de polylinéaires dont les couleurs correspondent au carrefour lui-même et aux différentes branches de ce carrefour. L'ensemble est dessiné sur une orthophotographie, et une série de boutons peut être utilisée à la demande pour afficher le carrefour dans les outils web habituels (OSM, Google Maps, Google Street View).

L'outil génère un fichier d'évaluation pour chaque zone d'intérêt, qui peut être exploré à l'aide d'une interface dédiée (figure 5.2), afin d'avoir un aperçu synthétique du résultat de l'algorithme dans la zone considérée.

5.1.1 Évaluation de crseg

Pour l'évaluation statistique, nous avons sélectionné trois villes de taille représentative des villes françaises : la ville 1 (Paris, 10 785 092 habitants dans l'aire urbaine), la ville 2 (Nantes, 650 081 habitants dans l'aire urbaine) et la ville 3 (Clermont-Ferrand, 268 696 habitants dans l'aire urbaine). Sur chacune d'entre elles, nous avons sélectionné un point et récupéré toutes les données OSM dans un rayon de deux kilomètres autour de ce point (voir figure 5.3).

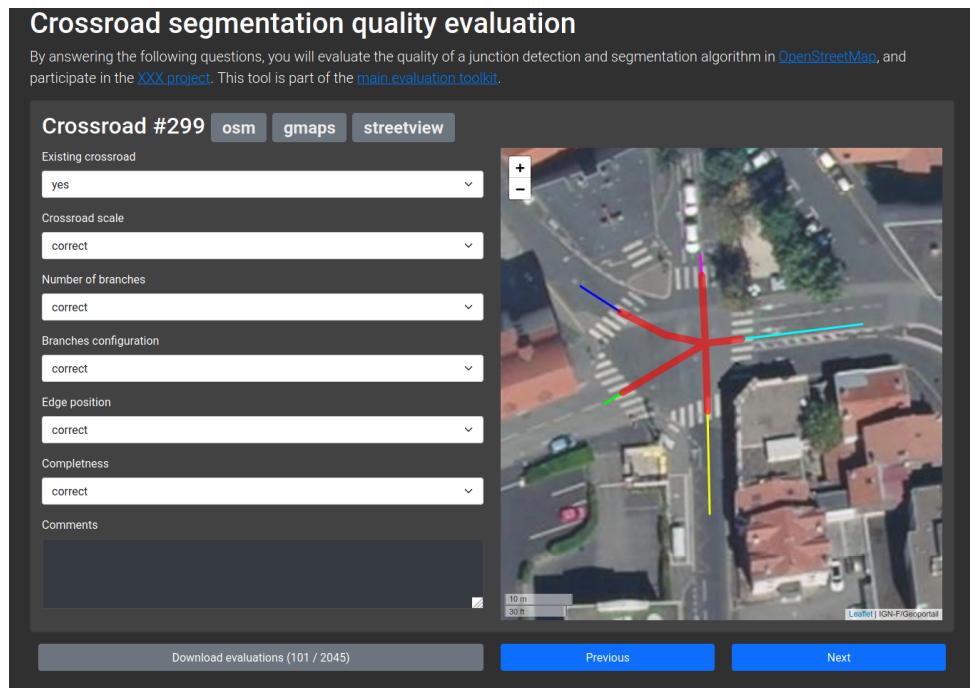


FIGURE 5.1 – Interface de l’outil d’évaluation. Source : [FK22].



Nous avons appliqué le processus de segmentation sur chacune des régions, obtenant un total de 5 553 carrefours. Le tableau 5.1 donne pour chaque région la répartition des carrefours selon leur complexité : carrefours avec un seul noeud, carrefours avec plusieurs noeuds dont un seul a une cardinalité supérieure à 2, carrefours avec plusieurs noeuds de cardinalité supérieure à 2.

Région	#total	#simple	#intermédiaire	#complexe
1	1,818	265	1,541	12
2	1,778	573	1,190	15
3	1,957	1,006	931	20
toutes	5,553	1,844	3,662	47
ratio		33.2%	65.9%	0.8%

TABLE 5.1 – Complexité des carrefours générés dans chaque région : carrefours avec un seul noeud, carrefours avec plusieurs noeuds dont un seul a une cardinalité supérieure à 2, carrefours avec plusieurs noeuds de cardinalité supérieure à 2. Source : [FK22].

Nous avons utilisé l’outil d’évaluation présenté dans la partie 5.1 dans chaque région, en évaluant au hasard 100 carrefours à chaque fois. Le tableau 5.2 montre que la répartition des carrefours en fonction de leur complexité est comparable à celle de toutes les régions. L’évaluation nécessitait de répondre aux questions suivantes :

- Carrefour existant : *oui* ou *non*,
- Échelle du carrefour : *correcte*, *trop grande* ou *trop petite*,
- Nombre de branches : *correct*, *trop peu* ou *trop nombreuses*,
- Configuration des branches : *correcte*, *deux branches ou plus sont fusionnées, une branche ou plus sont divisées* ou *branches fusionnées et divisées*,
- Position des bordures (relatif au centre du carrefour) : *correctes*, *trop proches* ou *trop éloignées*,
- Complétude : *correcte*, *parties manquantes* ou *parties en trop*.

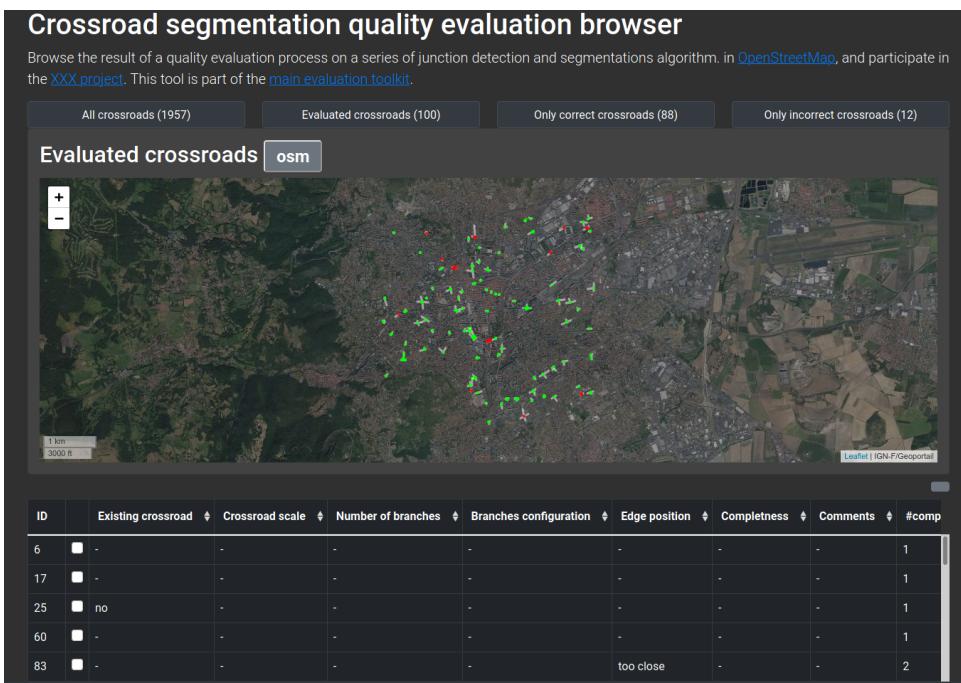


FIGURE 5.2 – Interface pour explorer les évaluations réalisées. Source : [FK22].

Région	#total	#simple	#intermédiaire	#complexe
1	100	29	70	1
2	100	17	83	0
3	100	52	45	3
toutes	300	98	198	4
ratio		32.7%	66%	1.3%

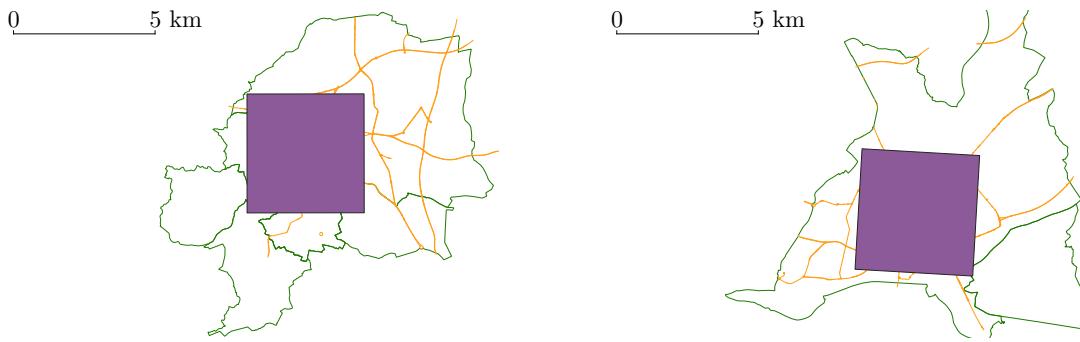
TABLE 5.2 – Complexité des carrefours choisis au hasard : carrefours avec un seul noeud, carrefours avec plusieurs noeuds dont un seul a une cardinalité supérieure à 2, carrefours avec plusieurs noeuds de cardinalité supérieure à 2. Source : [FK22].

Sur ces 300 carrefours, 245 ont été évalués comme valides en comparant la segmentation avec l'orthophotographie proposée par l'interface (voir Tableau 5.3).

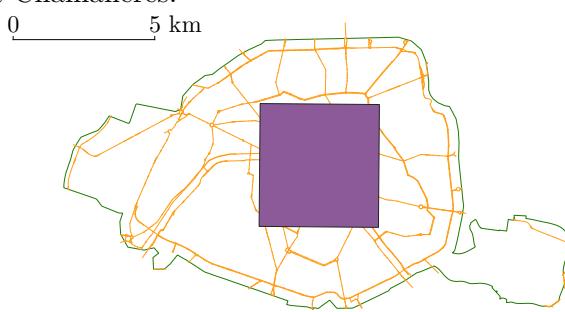
Région	#total	#sélectionné	#segmentation valide
1	1,818	100	81
2	1,778	100	76
3	1,957	100	88

TABLE 5.3 – Description du jeu de données : pour chaque région, le nombre de carrefours obtenus par notre algorithme, le nombre de carrefours sélectionnés aléatoirement (100), et le nombre de segmentations valides par rapport à l'orthophotographie. Source : [FK22].

Sur les 55 carrefours restants, 26 sont affectés par un problème d'ajustement des limites, l'orthophotographie montrant un passage piéton qui aurait dû être inclus dans la segmentation. Après analyse, 11 carrefours sont concernés par des passages piétons manquants dans OSM, 3 carrefours par un passage piétons dépassé ou mal positionné, et 2 carrefours car une rue adjacente est une piétonne selon OSM, ce qui semble incorrect au regard de l'orthophotographie. Les 10 autres limites mal positionnées nécessiteraient un ajustement local du paramètre C0.



(a) Région sélectionnée centrée sur le centre historique de Clermont-Ferrand. La région historique de Nantes. La région contient également des rues qui font partie des villes de Saint-Sébastien suivantes : Clermont-Ferrand, Aubière, Beau- sur Loire, mont, Ceyrat, Royat et Chamalières.



(c) Région sélectionnée centrée sur Paris.

FIGURE 5.3 – Régions sélectionnées pour l'évaluation statistique. Source : [FK22].

Parmi les carrefours restants, 21 ont été considérés comme ayant des parties manquantes ou comme étant à une échelle trop grande ou trop petite. Il y a plusieurs causes à cela :

- pour 2 d'entre eux, il s'agit d'une voie manquante dans la modélisation OSM,
- pour 3 autres, une rue adjacente a été identifiée dans OSM comme n'étant pas accessible aux voitures,
- pour 4 autres, il s'agit de routes bordant ou entrant dans une place, espaces non pris en compte par l'algorithme,
- pour 12 d'entre eux, l'ajustement local du paramètre C1 ou C2 aurait permis de corriger la segmentation.

Deux carrefours ont été considérés comme inexistant. Après analyse, il s'agissait d'approximations dans la modélisation OSM (voie privée mal étiquetée, modélisation inexacte d'un passage piéton linéaire).

L'un des carrefours avait ses trois branches combinées en une seule. L'algorithme n'a pas interprété correctement un carrefour en T dans un quartier résidentiel où chaque branche portait le même nom. 

L'un des carrefours a vu l'une de ses branches divisée en deux branches. Après analyse, ces deux voies correspondaient à la desserte d'un parking et n'avaient pas de nom, ce qui empêchait l'algorithme de les associer.

Enfin, nous avons également identifié un carrefour situé au milieu d'un parc, et 3 carrefours au milieu de parkings, ce qui invite à un travail plus poussé sur le filtrage des données OSM.

En résumé (figure 5.4), la segmentation de 23 carrefours peut être corrigée en ajustant localement l'un des trois paramètres de la méthode, 18 carrefours sont imprécis en raison de l'absence ou de l'imprécision des données dans OSM, et 14 carrefours illustrent le manque de généralité de notre algorithme, qui ne prend pas en compte les voies fermées aux voitures, les voies sans nom, les carrefours ayant le même nom sur toutes les branches, ou encore le contexte (place, parc, parking).

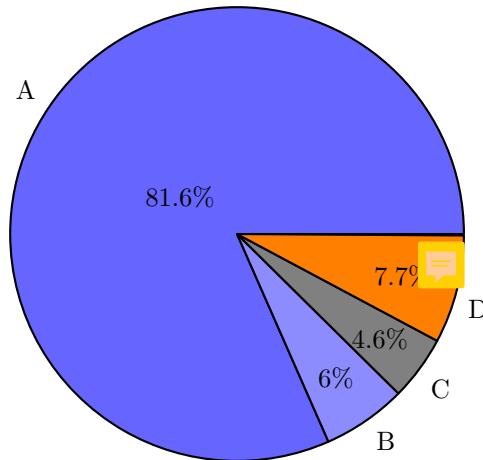


FIGURE 5.4 – Répartition des carrefours considérés lors de notre processus d'évaluation (Table 5.3) en fonction de leur typologie. A (245 carrefours) : segmentation correspondant à l'orthophotographie, B (18 carrefours) : manque ou imprécision dans OSM, C (14 carrefours) : régions non supportées, D (23 carrefours) : nécessite un ajustement local des paramètres. Source : [FK22].

5.1.2 Évaluation de crmodel

L'évaluation de l'implémentation de crmodel permet d'estimer sa capacité à générer des descriptions satisfaisantes au regard des données disponibles dans OpenStreetMap. Nous avons choisi de réaliser l'évaluation sur trois villes françaises : Lyon (522 969 habitants), Clermont-Ferrand (147 865 habitants) et Brive-la-Gaillarde (46 330 habitants).

La qualité de la description a été évaluée en fonction de sa conformité avec le terrain et les données disponibles. Une description définie comme correcte correspond au terrain. Une description partiellement correcte indique qu'elle correspond en partie au terrain mais que les données, l'implémentation ou la segmentation étaient insuffisantes pour fournir une description complète. Une description incorrecte ne correspond pas du tout au terrain. Des descriptions de 20 carrefours par ville, choisis au hasard, ont été générées et l'instanciation des branches et des traversées a été évaluée. L'évaluation est basée sur l'outil proposé par en partie 5.1. Les valeurs des attributs OpenStreetMap ont été confrontées aux images aériennes afin d'évaluer les problèmes de données. Les dispositifs sonores des passages piétons n'ont pas été pris en compte car les images aériennes ne permettent pas de vérifier cette information. L'évaluation nécessitait de répondre aux questions suivantes :

- Première branche au nord : *oui*, *non* ou *indéfini*

- Présence des voies sur OSM : *corrects, attributs manquants ou objets manquants*,
- Nombre de voies : *correct, trop peu ou trop nombreuses*,
- Types de voies : *corrects, incorrects*, 
- Ordre des voies : *corrects, incorrects*,
- Présence des passages piétons sur OSM : *corrects, attributs manquants ou objets manquants*,
- Génération des traversées : *correctes, incorrectes ou trop peu ou trop nombreuses*

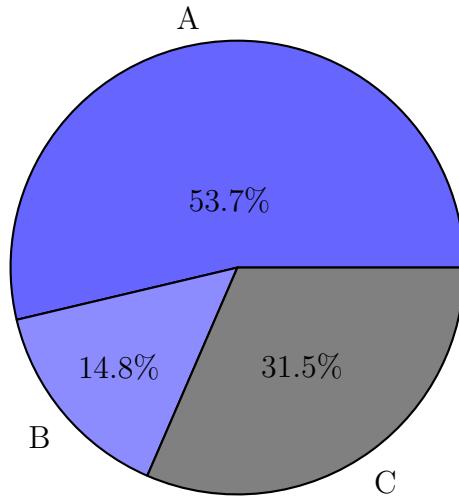


FIGURE 5.5 – Distribution des types de problèmes rencontrés au cours du processus d'évaluation. A (29 carrefours) : objets ou attributs manquants dans OpenStreetMap, B (8 carrefours) : problèmes d'implémentation, soit des attributs non supportés, soit des erreurs d'algorithme, C (17 carrefours) : erreurs mélangeant l'implémentation, la segmentation et les problèmes de données.

La description du nombre et des noms des branches est celle qui donne les meilleurs résultats. Ceux-ci dépendent principalement de la qualité de la segmentation (19 intersections sur 20, soit 95% des erreurs rencontrées). Les descriptions des voies des branches et les descriptions des traversée sont plus sensibles à la qualité des données OpenStreetMap (respectivement 26 sur 41 et 30 sur 36 intersections, soit 63,4% et 83,3% des erreurs rencontrées). Les voies sont également fortement affectées par les erreurs d'implémentation (19 intersections sur 41, soit 46,3% des erreurs rencontrées) car toutes les clés OSM, notamment celles relatives aux lignes de bus, n'ont pas été prises en compte. Ces résultats sont résumés dans le tableau 5.4.

Qualité de la description	Nombre et noms des branches	Voies des branches	Traversées
Correct	40	19	24
Partiellement correct	17	40	34
Incorrect	3	1	2
Nombre de carrefours	60	60	60

TABLE 5.4 – Qualité de la description par type de données.

Les résultats globaux indiquent que seuls 6 carrefours de l'échantillon ont été parfaitement décrits. D'autre part, 56 intersections ont été au moins partiellement décrites

correctement. Le principal problème à l'origine de la dégradation de la description est la qualité des données OSM (figure 5.5) où les clés ou les objets manquants ont eu un impact sur la description. On peut cependant noter que les trois villes choisies n'ont pas la même qualité de données OSM (Tableau 5.5).

Type de problème	Lyon	Clermont-Ferrand	Brive-la-Gaillarde
Lié à OSM	8	13	17
Non-lié à OSM	9	4	3
Nombre de problèmes	17	17	20
Nombre de carrefours	20	20	20

TABLE 5.5 – Problèmes rencontrés et leur relation avec les données OSM par ville.

5.2 Évaluation du canevas de description

Le canevas de conception de description décrit dans le chapitre 3 et implémenté dans le chapitre 4 a notamment été appliqué à la description de carrefours (voir partie 4.1). Dans cette partie, nous confrontons la description produite par notre chaîne à l'expertise des professionnels de la déficience visuelle pour déterminer les types de modifications qui pourraient être apportés au canevas. Puis nous évaluons la capacité de notre canevas à intégrer ces modifications.

5.2.1 Enquête auprès des professionnels

Le plan de description que nous avons présenté dans le chapitre 4 a été utilisé comme référence pour générer les descriptions des carrefours. Cette description, bien qu'issue d'échanges avec des personnes concernées ne répond pas nécessairement à la diversité des besoins exprimés par les utilisateurs. Pour évaluer sa correspondance avec les usages, et déterminer quels éléments pourraient être modulés, nous avons réalisé une enquête auprès de professionnels liés à la déficience visuelle.

L'enquête a été réalisée avec l'outil en ligne LimeSurvey. Elle présente aux utilisateurs deux descriptions de carrefours générées par la chaîne présentée en partie 4.1. Les deux carrefours choisis et leurs descriptions associées sont illustrés en figure 5.6. Pour chacun des carrefours, l'enquête présente une orthophotographie Google Satellite interactive centrée sur le carrefour et une vue immersive Google StreetView au même emplacement pour permettre aux participants de se familiariser avec le carrefour. Elle présente enfin la description du carrefour telle que générée par la chaîne présentée en partie 4.1, et invite les participants à modifier cette description pour l'adapter à leurs besoins et leurs pratiques. Il est à noter que les descriptions ont été générées le 8 juillet 2022.

L'enquête a démarré le 5 septembre 2022 et a été transmise au réseau national des IA par une instructrice de Clermont-Ferrand. Nous avons exporté les résultats le 24 mai 2023. Nous avons reçu six réponses, parmi lesquelles la moitié présentent des modifications dans les descriptions des carrefours. Deux réponses supplémentaires de personnes n'étant pas allées au bout du questionnaire mais ayant fourni des descriptions modifiées ont été prises en compte dans l'analyse. La totalité des réponses envoyées proviennent d'IA, dont un a



Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

La branche numéro un qui s'appelle cours Sablon est composée de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux qui s'appelle avenue Carnot est composée d'une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

La branche numéro trois qui s'appelle cours Sablon est composée de deux voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro quatre qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies de circulation sortantes, et une voie de bus entrante.

La branche numéro un se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro deux se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

Le carrefour à l'intersection du boulevard Berthelot, de la rue Jean-Baptiste Torrilhon, de l'avenue Franklin Roosevelt et de l'avenue Joseph Claussat est un carrefour à 5 branches.

La branche numéro un qui s'appelle boulevard Berthelot est composée d'une voie de circulation sortante, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux qui s'appelle rue Jean-Baptiste Torrilhon est composée d'une voie de circulation sortante.

La branche numéro trois qui s'appelle avenue Franklin Roosevelt est composée d'une voie de circulation entrante.

La branche numéro quatre qui s'appelle boulevard Berthelot est composée de deux voies de circulation sortantes, et une voie de circulation entrante.

La branche numéro cinq qui s'appelle avenue Joseph Claussat est composée d'une voie de circulation sortante, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro un se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il n'y a pas de bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro deux ne se traverse pas.

La branche numéro trois ne se traverse pas.

La branche numéro quatre se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro cinq se traverse en une fois. Les passages piétons ne sont pas protégés par des feux. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

FIGURE 5.6 – Les deux carrefours de Clermont-Ferrand choisis pour l'enquête présentent deux configurations différentes. Il s'agit dans les deux cas de carrefours complexes présentant des îlots et des particularités dans leurs cheminements. Source : BD Ortho IGN.

exercé plus de vingt ans, deux entre dix et vingt ans, un entre trois et neuf ans et deux entre un et deux ans. Les réponses non-envoyées ne contenaient pas ces informations.

Pour analyser les réponses obtenues, nous avons choisi d'étiqueter les textes selon les modifications qui y ont été apportées. Les réponses au questionnaire étiquetées sont présentes en annexe A. Nous avons choisi les étiquettes suivantes :

- **Reformulation simple** : l'information est réorganisée, les termes sont changés, mais le sens reste le même. Cela peut correspondre aux modifications simples de termes comme « La traversée se fait en trois fois » à la place de « La branche se traverse en trois fois » (ID 39).
- **Reformulation complexe** : le sens reste également le même et les mêmes données sont décrites mais la modifications des textes est plus élaborées. La réponse ID 52, par exemple, propose une refonte de la description des voies et des traversées en un seul paragraphe de description de branche succinct pour une traversée simple et plus complet pour une traversée longue.
- **Nouvelle information sans ajout de donnée** : une nouvelle information est ajoutée à la description, mais repose sur les données déjà disponibles dans CrModel. Elle peut nécessiter de nouveaux traitements sur celles-ci pour générer le texte. Par exemple, des précisions sur les voies reliant deux branches sont ajoutées par la réponse ID 39 : « dont l'une arrivant directement de la branche numéro quatre, sans passer par le coeur du carrefour ». La réponse ID 52 et ID 56 proposent également de renommer les branches selon leur orientation par rapport au centre du carrefour pour parler de branche « de devant » ou « à 10h ». Ces informations peuvent être dérivées du graphe produit par CrModel, mais ne sont actuellement pas produites par notre chaîne.
- **Nouvelles informations avec ajout de données** : une nouvelle information est ajoutée à la description, mais nécessite de recueillir et traiter de nouvelles données. Dans les réponses obtenues, on trouve notamment des infrastructures non prises en compte par CrModel comme les contre-allées (ID 39), les cédez-le-passage (ID 52), les feux sonores (ID 56), ou les pistes cyclables (ID 36). On y trouve également des informations plus poussées que celles fournies par CrModel, comme des détails sur les terre-pleins (ID 52, ID 36) ou le placement des BEV (ID 39, ID 56).

5.2.2 Intégration des modifications au canevas

Les étiquettes produites ci-dessus permettent de classer les modifications proposées par les instructeurs. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la possibilité d'introduire chaque type de modification au sein du canevas pour évaluer son extensibilité et son adaptabilité aux besoins exprimés. Pour cela, nous mobiliserons le canevas de description présenté en partie 4.1 qui a servi à générer les descriptions des carrefours utilisés pour l'enquête.

5.2.2.1 Reformulation simple

Les reformulations simples sont des modifications de texte qui ne nécessitent aucun traitement supplémentaire sur les données et peuvent s'appuyer sur les formes déjà préparées. Elles s'opèrent donc dans l'implémentation du patron de l'information décrite (voir figure 5.7).

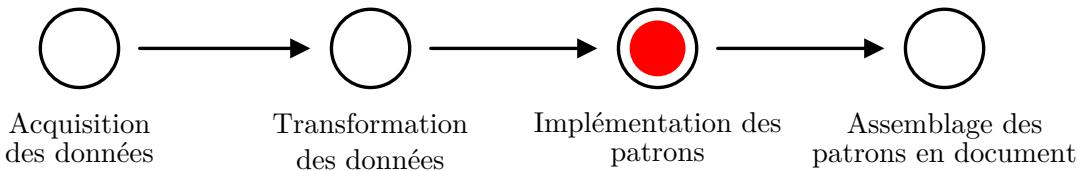


FIGURE 5.7 – La reformulation simple s'effectue dans l'implémentation du patron de l'information décrite.

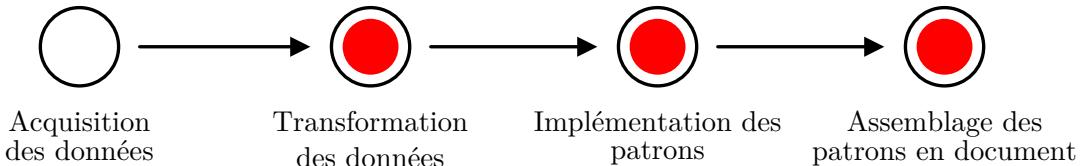


FIGURE 5.8 – La reformulation complexe agit sur de nombreuses briques de la chaîne de description.

La complexité de la modification peut cependant varier :

- **Substitution** : Une modification proposées par la réponse ID 52 sur le carrefour 1 propose de remplacer dans la description des traversées le terme « protégés » par « régulés » pour indiquer la présence d'un feu. Il s'agit ici d'une substitution d'un terme par un autre, sans modification de la structure de la phrase. Cette modification peut être intégrée en substituant simplement le terme dans le patron de description.
- **Modification du patron** : Une modification proposée par ID 32 sur le carrefour 1 propose de reformuler la description d'une branche en réagenceant les informations de voies par type et non par sens de circulation. Cette modification s'appuie sur les mêmes données que la description initiale, mais nécessite de modifier la structure de la phrase. De nouvelles règles de génération de texte devront être ajoutées au patron pour prendre en compte cette modification.

5.2.2.2 Reformulation complexe

Les reformulations complexes, au contraire des reformulations simples, ne s'appuient pas directement sur les formes de données déjà préparées mais sur la fusion de celles-ci pour proposer un texte plus élaboré. Elles s'opèrent sur la transformation des données pour fusionner les informations nécessaires, sur l'implémentation du patron pour concevoir le nouveau texte en accord avec le nouveau schéma, et sur l'assemblage des descriptions pour transformer le plan en accord avec le nouveau texte (voir figure 5.8).

Une modification fournie par la réponse ID 51 sur le carrefour 1 propose de fusionner les descriptions des voies et des traversées en un seul paragraphe. Cette modification nécessite la réalisation de plusieurs étapes :

- **Transformation des données** : Les tables des branches (table 4.2) et des traversées (table 4.3) doivent être jointes en une seule table pour permettre leur description simultanée.
- **Implémentation du patron** : La nouvelle table de description des branches et des traversées ne dispose d'aucun patron de description. En accord avec le texte proposé par la réponse ID 52, un nouveau patron doit être implémenté pour générer

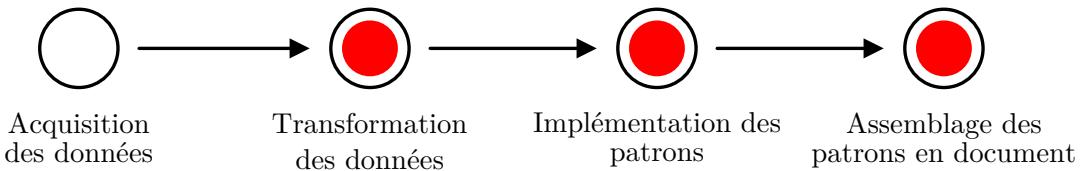


FIGURE 5.9 – La formulation d'une nouvelle information sans ajout de données agit sur les mêmes briques que la reformulation complexe. En revanche, des traitements algorithmiques plus complexes sont appliquées aux données d'entrées pour générer l'information nécessaire.

le texte souhaité.

- **Assemblage des descriptions :** La réponse ID 52 propose un plan remanié, où les parties dédiées à la description des branches et à la description des traversées sont remplacées par une unique partie décrivant les deux simultanément. L'étape d'assemblage doit donc être modifiée pour remplacer l'appel aux deux patrons précédents par le nouveau.

5.2.2.3 Nouvelle information sans ajout de données

Formuler une nouvelle information sans ajout de données consiste à se reposer sur les entrées déjà disponibles dans la chaîne pour générer un nouveau texte contenant une information absente de la description d'origine. Cela signifie qu'il est nécessaire d'appliquer de nouveaux algorithmes aux données en entrées pour faire émerger ces informations. Cette dernière étape s'opère donc dans la transformation des données, puis dans l'implémentation du patron pour générer le nouveau texte en accord avec le nouveau schéma. L'assemblage des descriptions peut également être modifié si la nouvelle information nécessite de revoir la structure du plan de description (voir figure 5.9).

Une modification fournie par la réponse ID 39 sur le carrefour 1 propose d'ajouter des précisions sur les voies reliant deux branches (dites « voies de raccourci ») aux paragraphes de description des branches. Les étapes d'implémentation de cette modification sont les suivantes :

- **Transformation des données :** Les voies de raccourci sont présentes dans le graphe du carrefour généré par crseg, mais pas sémantiquement délimitées ni par crseg ni par crmodel. Une étape au sein du SIG est donc ici nécessaire pour calculer si un segment routier permet de relier deux branches sans passer par le centre du carrefour. Si c'est le cas, la table de données des branches doit être modifiée pour refléter cette information.
- **Modification du patron :** Le patron décrit une branche doit être modifié pour refléter la présence d'une voie de raccourci, sous la forme d'un nouvel attribut dans la table.

5.2.2.4 Nouvelle information avec ajout de données

Formuler une nouvelle information avec ajout de données consiste à ajouter de nouvelles données en entrée pour générer un nouveau texte contenant une information absente de la description d'origine. Cela signifie qu'il est nécessaire, à l'instar du processus présenté en partie 4.1, de les transformer pour les adapter à la description que l'on souhaite en faire. Il peut par ailleurs être nécessaire de les fusionner aux données originellement

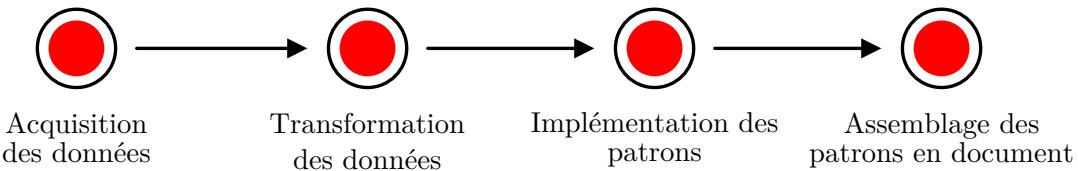


FIGURE 5.10 – La formulation d'une nouvelle information avec ajout de données agit sur les mêmes briques que la catégorie précédente. En revanche, l'ajout de nouvelles données implique de revoir l'intégralité de la chaîne.

présente en entrée de la chaîne. Ces étapes peuvent donc s'opérer sur l'intégralité de la chaîne, de la transformation des données à l'assemblage des descriptions (voir figure 5.10).

Des modifications fournie par les réponses ID 52 et ID 56 proposent d'ajouter des informations sur les feux sonores aux descriptions des traversées. Ces informations sont présentes dans OSM mais ne sont pas intégrées à CrModel. Il est donc nécessaire de les acquérir et de les traiter pour les intégrer à la description. Les étapes d'implémentation de cette modification sont détaillées ci-dessous :

- **Intégration des données** : Les feux sonores sont présents dans OSM sous la forme d'une clé (`traffic_signals:sound`) sur les passages piéton. Il est possible de télécharger les passages piéton sur la zone d'intérêt pour les intégrer au SIG.
- **Transformation des données** : crmodel conserve pour chaque objet issu d'OSM les identifiants qui lui sont associées. Il est donc possible de réaliser une jointure entre les données nouvellement importées et les traversées existantes pour ajouter un champ à la couche indiquant la présence ou l'absence de feux sonores sur la traversée.
- **Modification du patron** : Le patron décrivant une traversée doit être modifié en accord avec le nouveau champ créé pour refléter la présence ou l'absence de feux sonores.



5.3 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté les évaluations statistiques de crseg et crmodel, les deux outils développés dans le cadre de cette thèse pour générer un modèle de carrefour, et nous avons vu que leur résultat était très dépendant de la qualité des données OSM.

Nous avons également réalisé une évaluation du canevas de description en confrontant sa modularité aux besoins exprimés par les professionnels de la déficience visuelle. Ces besoins ont été recueillis au sein d'une enquête visant à adapter une description à leurs pratiques. Les réponses ont été interrogées par type de modification et nous avons, pour chaque type, déterminé les étapes nécessaires à l'intégration de ces modifications au sein du canevas.

Chapitre 6

Conclusions et perspectives

6.1 Discussion générale

Dans le cadre de cette thèse, nous sommes partis du constat que, si la littérature traite de l'accessibilité des milieux urbains aux PCDV, peu d'études se sont spécifiquement intéressées aux carrefours. Or, ces espaces sont particulièrement critiques pour les personnes déficientes visuelles et nécessitent des compétences avancées en orientation et mobilité pour les traverser en sécurité [RC19]. Par ailleurs, s'il existe des dispositifs mobiles permettant de s'orienter au cours d'un trajet, les seules manières d'étudier un lieu ex-situ (et à fortiori un carrefour) restent la description ad-hoc par une personne tierce ou l'utilisation de cartes en relief. Il s'agit également d'un problème pour les IA lors de séance de locomotion : l'étude d'un nouveau terrain implique la préparation manuelle de cartes en relief et de descriptions adaptées aux besoins de la personne accompagnée, ce qui peut être chronophage. Pour répondre à ces problématiques, nous avons souhaité aborder le problème sous l'angle de la modélisation du carrefour du point de vue d'un piéton déficient visuel pour, à minima, en proposer une description textuelle, mais potentiellement répondre également à d'autres usages.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la définition du carrefour du point de vue du piéton, et nous avons estimé qu'il s'agissait d'un espace délimité par des passages piétons. Sur cette base, nous avons proposé une définition du carrefour sous la forme d'un graphe géographique qui modélise notamment les branches du carrefours et les traversées piétonnes de celles-ci. Nous nous sommes par la suite intéressé à la possibilité de générer un tel graphe depuis OSM, en analysant ses possibilités et les données actuellement renseignées, et en proposant un modèle de données objet pouvant accueillir ces informations et faciliter leur manipulation. Nous avons étudié l'instanciation de ce modèle depuis OSM au travers d'une méthode de segmentation des carrefours au sein d'un graphe routier, élaborée à partir de la définition établie précédemment. Enfin, nous avons proposé des méthodes de complétion de ce graphe de carrefour pour permettre son analyse du point de vue de sa traversée par un piéton.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux possibilités offertes par le modèle de carrefour conçu précédemment pour décrire textuellement un carrefour. Cependant, les besoins des personnes concernés et des instructeurs étant très variés, il est nécessaire de concevoir une chaîne permettant cette variabilité dans le fond et la forme du texte. Pour répondre à cette problématique, nous avons proposé un cadre générique de génération de description textuelle d'objets géographiques au sein d'un SIG. Ce cadre,

inspiré de la littérature « donnée vers texte » repose sur la conception de patrons textuels pour définir la forme que prendra le texte pour chaque donnée. Dans une étape d'assemblage du document final, nous définissons un plan de description où chaque patron est sélectionné et ordonné selon la sortie souhaitée. Nous avons proposé l'application de ce cadre à la description de carrefour et avons souligné l'intérêt d'insérer un géomaticien dans la chaîne de conception de description pour implémenter techniquement les textes établis par les instructeurs. Nous avons également proposé d'autres cas d'utilisation appliqués à l'intégration de ces descriptions dans des médiums interactifs.

Par la suite, nous avons présenté les implémentations des méthodes évoquées précédemment et fourni des exemples de résultats. Nous avons implémenté les méthodes de segmentation du carrefour et de complétion de données piétonnes en Python sous la forme des modules crseg et crmodel. Ces derniers ont été embarqués en entrée de la chaîne technique de génération de description textuelle réalisée sous le SIG QGIS. Pour cette dernière, nous avons implémenté deux boîtes à outils permettant d'une part de définir un patron par couche, et d'autre part d'assembler ces patrons au sein d'un document avec un système de sélection du patron adapté. Nous avons mobilisé cette chaîne pour la génération de quatre types de descriptions de carrefour adaptées à différents médiums, usages, et niveau d'interactivité.

Enfin, nous avons proposé d'évaluer les différents dispositifs conçus lors de nos travaux. Nous avons tout d'abord évalué les outils de segmentation de carrefour crseg et de complétion de données piétonnes crmodel en comparant leurs résultats à un oeil expert sur plusieurs échantillons de carrefours. Pour le premier, cela nous a permis de valider le fonctionnement de la méthode et d'estimer sa sensibilité aux paramètres et à la donnée en entrée. Nous avons pu voir pour le second que la qualité du résultat était particulièrement dépendante de la complétude des données OSM en entrée. Par la suite, nous nous sommes intéressés à la capacité de la chaîne de description à s'adapter à des besoins variés. Pour cela, nous avons émis un questionnaire à des IA pour collecter des modifications du plan de description originellement établi. Nous avons catégorisé ces modifications, et pour chacune nous avons évalué la possibilité de les intégrer dans la chaîne de génération de description.

6.2 Perspectives

Dans cette dernière partie, nous allons discuter des perspectives ouvertes par nos travaux et des pistes de recherche futures.

6.2.1 Vers des données plus précises

Depuis le début de nos travaux, les questions autour de la mobilité des personnes concernées par un handicap ont pris une place importante dans le débat public. En particulier, la LOM promulguée en 2019 a introduit de nouvelles obligations pour les gestionnaires de voirie, dont la collecte et la mise à disposition de données d'accessibilité de la voirie et des réseaux à deux cents mètres autour des arrêts de transport en commun. Ces données, fournies dans un format standardisé par le CNIG [21] qui étend le format NeTEx, visent une précision très grande dans la description des cheminements piétons (voir figure 6.1). Si la disponibilité de ces données est encore parcellaire, elles pourraient à terme devenir une source de données privilégiée pour étendre et préciser les capacités de

description de carrefour que nous avons proposées. Des travaux préliminaires menés par WADJOM KAMMEGNE [Wad21] s'intéressent à la compatibilité entre le modèle du CNIG et celui d'OSM, et pourraient servir de base à une intégration de ces données dans notre modèle.

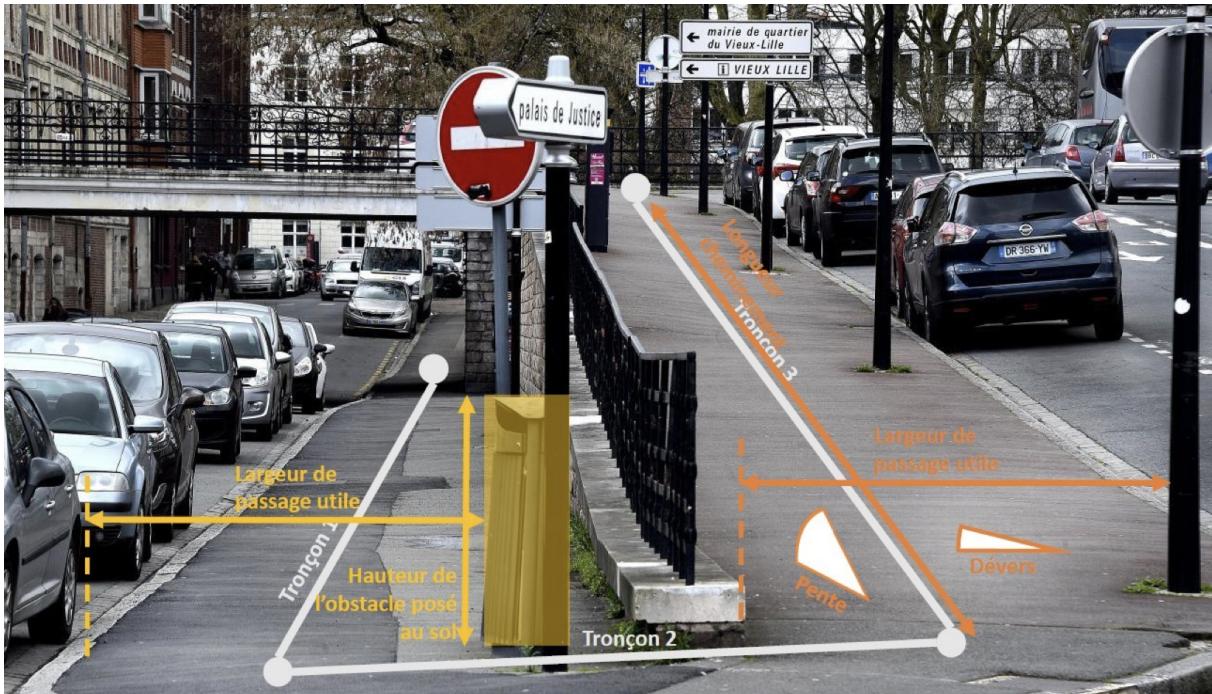


FIGURE 6.1 – Exemple de graphe pouvant correspondre à un cheminement décrit dans le formalisme du géostandard accessibilité du CNIG. Source : [21].

Par ailleurs, un intérêt particulier autour de l'accessibilité ces dernières années amènent les données OSM à s'améliorer constamment. Outre les évolutions autour de la sémantique permettant une description plus fine des infrastructures^{1 2}, l'émergence de nouveaux outils spécialisés pour améliorer les données autour de l'accessibilité comme EveryDoor³ ou OSM Sidewalkreator [DCS23] contribue à une accélération de la cartographie de ces informations.

6.2.2 Aller au-delà du carrefour

Dans les travaux présentés dans ce manuscrit, nous avons essentiellement travaillé sur les carrefours en tant qu'objets isolés. Il s'agit cependant d'étapes qui s'inscrivent au sein d'un itinéraire [Gau06] plus large dans la ville, or les descriptions que nous produisons ne recontextualisent pas les carrefours en dehors des noms de rues (voir chapitre 3). Une proposition que nous avions émise dans le « carrefour dont vous êtes le héros » (voir 4.3) était d'associer une direction à une branche, sous la forme d'un point d'intérêt connu au sein de la ville. Déterminés manuellement dans cette expérimentation, ces points d'intérêt pourraient être extraits automatiquement. Des travaux préliminaires ont été menés par Ao⁴ [Aou23] qui propose de sélectionner pour chaque branche le point d'intérêt (parmi

1. <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Proposal:Crossing:markings>

2. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Proposal:Key:is_sidepath

3. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Every_Door

une préselection de type d’entité) le plus proche selon la distance de Manhattan et la direction pointé par la branche (voir figure 6.2).

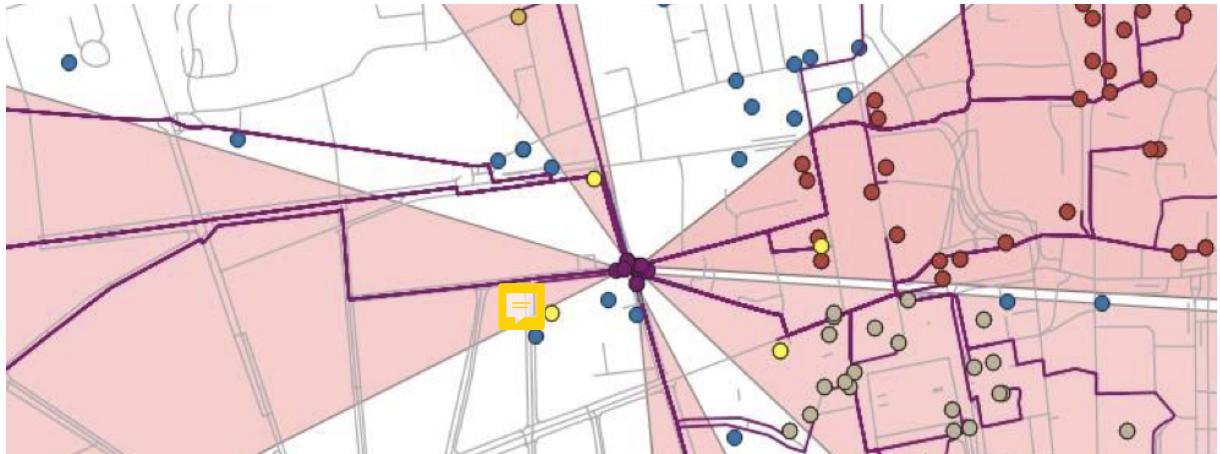


FIGURE 6.2 – Exemple de résultat obtenu par la méthode proposée par AOUIINI [Aou23] pour labelliser les branches d’un carrefour. Source : [Aou23].

Par ailleurs, si nous nous sommes concentrés sur la description des carrefours, ces derniers peuvent être un point de départ à la description de quartiers. C’est le travail amorcé par GUILLAUMIN WANG [GW23] qui s’intéressent à la description du chemin entre les carrefours. Ils proposent d’utiliser les résultats fournis par crseg et de considérer les carrefours comme des noeuds. Les arêtes du graphe de quartier sont alors les branches des carrefours étendues jusqu’au prochain carrefour (voir figure 6.3). Cette approche permet de décrire des quartiers entiers, et de proposer des itinéraires en utilisant les carrefours comme points de passage.



FIGURE 6.3 – Exemple d’un graphe de quartier. Les carrefours deviennent des noeuds liés entre eux par leurs branches.

6.2.3 Les apports de l'intelligence artificielle

Au début de nos travaux, nous avons fait le choix pour la génération de texte de nous reposer sur la méthode des patrons textuels, classiques dans le domaine « données vers texte » (voir chapitre 3). Notre objectif à travers ce choix était notamment de s'assurer de la fiabilité de la mise en forme du texte définie par le plan de description, les intelligences artificielles génératives étant promptes aux « hallucinations » [Ye23] et aux erreurs d'interprétation (voir figure 6.4). Par ailleurs, il n'existe aucun corpus de description de carrefour pour entraîner un modèle.



FIGURE 6.4 – Exemple d'image obtenue avec DALL-E Mini en juin 2022.

Cependant, cela rend la création d'un patron particulièrement lourde pour l'utilisateur, et nécessite une expertise techniques pour sa mise en œuvre. Notamment, notre approche nécessite l'usage d'un réalisateur de texte pour segmenter en syntagmes les parties du texte dont l'assemblage grammatical fera varier les prépositions, les déterminants, les pluriels, etc. Il serait envisageable de déléguer cette tâche à un modèle de langage génératif en indiquant des contraintes de mise en forme [Whi23] (voir figure 6.5). En revanche, au contraire de la solution choisie, l'impact énergétique d'un modèle de langage n'est pas négligeable [de 23].

Peux-tu reformuler chaque relation ci-dessous sous la forme "Le bus C part de l'arrêt Couron Toulalts et va jusqu'à l'arrêt Tamaris". Relation T2C C : Cournon Toulalts → Tamaris (9415985) (avec le rôle stop) Relation T2C B : Stade Marcel Michelin → Royat Place Allard (9413210) (avec le rôle stop) Relation T2C 9 : Georges Besse → Trémonteix Eychart (12889353) (avec le rôle stop) Relation Navette Clermont-Ferrand -> Vulcania (3149225) (avec le rôle stop)

Voici les relations reformulées sous la forme demandée:

- Le bus C part de l'arrêt Cournon Toulalts et va jusqu'à l'arrêt Tamaris.
- Le bus B part de l'arrêt Stade Marcel Michelin et va jusqu'à l'arrêt Royat Place Allard.
- Le bus 9 part de l'arrêt Georges Besse et va jusqu'à l'arrêt Trémonteix Eychart.
- La navette part de l'arrêt Clermont-Ferrand et va jusqu'à l'arrêt Vulcania.

FIGURE 6.5 – Exemple de mise en forme d'une donnée structurée en texte en utilisant GPT-4 (interface Bing Search en 2023).



Annexe A

Réponses au questionnaire envoyé aux IA

Légende

Reformulation simple
Reformulation complexe
Nouvelle informations sans ajout de données
Nouvelle informations avec ajout de données
Correction de l'information sans reformulation
Commentaire

ID 39

Carrefour 1

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

La branche numéro un qui s'appelle cours Sablon est composée d'une contre-allée sortante, de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux qui s'appelle avenue Carnot est composée d'une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

La branche numéro trois qui s'appelle cours Sablon est composée de deux voies de circulation sortantes, et trois voies de circulation entrantes, dont l'une arrivant directement de la branche numéro quatre, sans passer par le coeur du carrefour.

La branche numéro quatre qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies de circulation sortantes, dont l'une partant directement vers la branche numéro quatre, sans passer par le coeur du carrefour, et une voie de bus entrante.

La branche numéro un se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance, sauf au niveau¹.

1. On suppose sur cette réponse que la phrase est incomplète.

La branche numéro deux se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

Carrefour 2

Le carrefour à l'intersection du boulevard Berthelot, de la rue Jean-Baptiste Torrilhon, de l'avenue Franklin Roosevelt et de l'avenue Joseph Claussat est un carrefour à 5 branches.

La branche numéro un qui s'appelle boulevard Berthelot est composée de deux voies de circulation sortantes, et d'une voie de circulation entrante.

La branche numéro deux qui s'appelle rue Jean-Baptiste Torrilhon est composée de trois voies de circulation sortantes.

La branche numéro trois qui s'appelle avenue Franklin Roosevelt est composée de deux voies de circulation entrantes, dont l'une arrivant directement de la branche numéro quatre.

La branche numéro quatre qui s'appelle boulevard Berthelot est composée de trois voies de circulation sortantes, dont l'une partant directement vers la branche numéro trois, et une voie de circulation entrante.

La branche numéro cinq qui s'appelle avenue Joseph Claussat est composée de deux voies de circulation sortantes, et d'une voie de circulation entrante.

La branche numéro un se traverse en une fois. Le passage piéton est protégé par un feu. Il n'y a pas de bandes d'éveil de vigilance.

Les branches numéro deux et trois se rejoignent en partie en amont du carrefour et se traversent ensemble. La traversée se fait en trois fois. Les passages piétons sont tous protégés par des feux. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par des feux. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro cinq se traverse en une fois. Le passage piéton est protégé par des feux. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

ID 52

Carrefour 1

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

(“postulat, je suis placé telle que le permet la prise de la photo du bas : sur le trottoir de droite à l’angle du cours Sablon et de l’avenue Carnot.”)

La branche **de devant** s’appelle cours Sablon. Elle est composée de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche **de droite** s’appelle avenue Carnot. Elle est composée d’une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

La branche **de derrière** s’appelle cours Sablon. Elle est composée de deux voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche **de gauche** s’appelle avenue Carnot. Elle est composée de trois voies de circulation sortantes, et une voie de bus entrante.

La branche numéro un se traverse en deux fois. (“cette phrase est fausse car il n’y a pas de terreplein central. La traversée se fait en une fois si on est non voyant. Si on est malvoyant et que l’on perçoit la petite zone de sécurité on adapter en traversant en deux fois mais je ne conseille pas. Ceci dépend du temps du feu vert piéton”)

C’est un carrefour à feu, sans répétiteur sonore de feu.

La branche **de devant** est large de 5 voies de circulation. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou écoute d’un démarrage.

La branche **de droite** est large de 3 voies de circulation. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou écoute d’un démarrage.

La branche **de derrière** se fait en 3 fois. Une première partie large de deux voies de circulation. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou écoute d’un démarrage. Elle est séparée par une zone de sécurité de la seconde partie. La seconde partie est large de 2 voies de circulation. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou écoute d’un démarrage. La troisième partie est séparée par une zone de sécurité. Elle est large d’une voie de circulation et pas dans l’axe des deux premières. Pas de feu piéton pour cette partie.

La branche **de gauche** se traverse en deux fois. Première partie concerne les véhicules dont la trajectoire est de gauche à droite. Ces véhicules n’ont pas de feu mais un cédez-le-passage. Par conséquent il n’y a pas de feu piéton sur cette partie de la traversée. Ici la largeur est de une voie de circulation.

Seconde partie concerne les véhicules dont la trajectoire est de droite à gauche. Ici la largeur est de 4 voies de circulation. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou écoute d’un démarrage.

Présence d’une zone de sécurité entre la première et la seconde partie de la traversée : identifiée par des petits terrepleins sur lesquels on ne marche pas et pas forcément dans la trajectoire. Il faudra se réorienter entre les deux parties de la traversée : elles ne sont pas alignées.

Les passages piétons sont tous régulés par un feu (“un feu ne protège pas”).

j’ai mis mes remarques entre parenthèse et guillemets

Carrefour 2

Le carrefour à l'intersection du boulevard Berthelot, de la rue Jean-Baptiste Torrilhon, de l'avenue Franklin Roosevelt et de l'avenue Joseph Claussat est un carrefour à 5 branches.

(“postulat, je suis placé telle que le permet la prise de la photo du bas : sur le trottoir de droite à l'angle de la rue berthelot et de la rue jean baptiste torrilhon ”)

La branche **de devant (à 12h)** s'appelle boulevard Berthelot. Elle est composée d'une voie de circulation sortante, et deux voies de circulation entrantes.

La branche **à 4h** s'appelle rue Jean-Baptiste Torrilhon est composée d'une voie de circulation sortante.

La branche **à 5h** s'appelle avenue Franklin Roosevelt est composée d'une voie de circulation entrante.

La branche **de derrière (à 6h)** s'appelle boulevard Berthelot est composée de deux voies de circulation sortantes, et une voie de circulation entrante.

La branche **à 10h** qui s'appelle avenue Joseph Claussat est composée d'une voie de circulation sortante, et deux voies de circulation entrantes.

C'est un carrefour à feux, sans répétiteur sonore de feu.

La branche **de devant** se traverse en une fois. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou à l'écoute d'un démarrage.

La branche **de 4h et de 5h** se traverse ensemble en 3 étapes. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou à l'écoute d'un démarrage.

La branche **de derrière** se traverse en deux fois. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou à l'écoute d'un démarrage.

La branche **à 10h** se traverse en une fois. Elle se traverse grâce au feu piéton, ou à l'écoute d'un démarrage.

j'ai mis mes remarques entre parenthèse et guillemets. Il manque un référentiel à chaque description de carrefour. On décrit toujours quelque chose par rapport à ce que l'on voit, ou entend... donc par rapport à notre situation dans l'espace. C'est essentiel pour comprendre et pour que chaque personne parle de la même chose.

ID 56

Carrefour 1

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour **en croix**, soit à 4 branches.

La branche numéro un, **au Nord**, qui s'appelle cours Sablon est composée de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux, **à l'Ouest**, qui s'appelle avenue Carnot est composée d'une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

La branche numéro trois, **au Sud**, qui s'appelle cours Sablon est composée de deux voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro quatre, **à l'Est**, qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies de circulation sortantes, et une voie de bus entrante.

La branche numéro un se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro deux se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

Carrefour 2

Le carrefour à l'intersection du boulevard Berthelot, de la rue Jean-Baptiste Torrilhon, de l'avenue Franklin Roosevelt et de l'avenue Joseph Claussat est un carrefour à 5 branches.

La branche numéro un, **au Nord**, qui s'appelle boulevard Berthelot est composée d'une voie de circulation sortante, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux, **à l'Est**, qui s'appelle rue Jean-Baptiste Torrilhon est composée de **3 voies de circulation sortantes**.

La branche numéro trois, **à l'Est**, qui s'appelle avenue Franklin Roosevelt, est composée de **2 voies de circulation entrantes, séparées par un terre-plein**.

La branche numéro quatre, **au Sud**, qui s'appelle boulevard Berthelot est composée de deux voies de circulation sortantes, et une voie de circulation entrante.

La branche numéro cinq, **à l'Ouest**, qui s'appelle avenue Joseph Claussat, est composée d'une voie de circulation entrante, et deux voies de circulation sortantes.

La branche numéro un se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu, **non sonore**. **Les bandes d'éveil à la vigilance sont présentes mais mal placées**.

La branche numéro deux est protégée par un feu, non sonore. Il n'y a pas de bandes d'éveil à la vigilance. Un terre-plein central sépare les branches deux et trois.

La branche numéro trois est protégée par un feu, non sonore et des bandes d'éveil à la vigilance. Il y a un terre-plein en bout de traversée qui permet d'accéder, soit à la traversée de la branche numéro 4, soit à l'accès du trottoir à l'angle de la rue Berthelot (branche 4) et Roosevelt (branche 3).

La branche numéro quatre est protégée par un feu, non sonore. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro cinq se traverse en une fois. Les passages piétons sont protégés par des feux, non sonores. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

ID 32 (non-envoyé)

Carrefour 1

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

La branche numéro un qui s'appelle cours Sablon est composée de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro deux qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies : une voie de bus sortante et une voir de bus entrante sur chaque extrémité de la rue. Entre ces deux voies de bus se trouve une voie de circulation entrante.

La branche numéro trois qui s'appelle cours Sablon est composée de deux voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes. Celles ci sont séparées par un terre-plein au niveau de la traversée.

La branche numéro quatre qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies de circulation sortantes, et une voie de bus entrante. La troisième voie de circulation sortante est en oblique par rapport au reste de la traversée.

La branche numéro un se traverse en deux fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro deux se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

ID 36 (non-envoyé)

Carrefour 1

Le carrefour à l'intersection du cours Sablon et de l'avenue Carnot est un carrefour à 4 branches.

LA DESCRIPTION SE FAIT DANS LE SENS HORAIRE

La branche numéro un qui s'appelle cours Sablon est composée de trois voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

IL Y A ÉGALEMENT UNE CONTRE ALLÉE MAIS ELLE N'EST PAS COMPRISSE DANS LA TRAVERSÉE PIETONNE

La branche numéro deux qui s'appelle avenue Carnot est composée d'une voie de bus sortante, et une voie de circulation et une voie de bus entrante.

JE NE SUIS PAS HABITUÉE AU MARQUAGE AU SOL DES VOIES DE BUS DE CETTE FAÇON C'EST ASSEZ PERTURBANT...

La branche numéro trois qui s'appelle cours Sablon est composée de deux voies de circulation sortantes, et deux voies de circulation entrantes.

La branche numéro quatre qui s'appelle avenue Carnot est composée de trois voies de circulation sortantes, et une voie de bus entrante.

La branche numéro un se traverse en deux fois. **SUR LE TERRE PLEIN CENTRAL ON TROUVE DES BARRIÈRES EN CHICANE POUR REJOINDRE LE DEUXIÈME PASSAGE PIÉTON** Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro deux se traverse en une fois. Les passages piétons sont tous protégés par un feu. Il y a des bandes d'éveil de vigilance.

La branche numéro trois se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

La branche numéro quatre se traverse en trois fois. Les passages piétons ne sont pas tous protégés par un feu. Il manque des bandes d'éveil de vigilance ou celles-ci sont dégradées.

SUR LE TROTTOIR DE LA RUE DES SABLONS IL Y A UN PISTE CYCLABLE MATÉRIALISÉE PAR DE LA PEINTURE BLANCHE ET SITUÉE AU CENTRE DU TROTTOIR

Bibliographie

- [04] *NF S32-002*. AFNOR, nov. 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>.
- [21] *Accessibilité Du Cheminement En Voirie - Collecte Des Données Sur l'accessibilité Du Cheminement Pour Les Personnes En Situation de Handicap*. Rapp. tech. Conseil National de l'Information Géographique, fév. 2021.
- [ACD19] Christina ASCHAN-LEYGONIE, Claire CUNTY et Paule-Annick DAVOINE. *Les systèmes d'information géographique*. Armand Colin, oct. 2019. 272 p. ISBN : 978-2-200-61718-9.
- [Ahm16] Dragan AHMETOVIC et al. « 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. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, sept. 2016, p. 90-99. ISBN : 978-1-4503-4408-1. DOI : 10.1145/2935334.2935361. URL : <https://doi.org/10.1145/2935334.2935361> (visité le 28/08/2023).
- [All00] Gary L. ALLEN. « Principles and practices for communicating route knowledge ». en. In : *Applied Cognitive Psychology* 14.4 (2000), p. 333-359. 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> (visité le 20/07/2023).
- [Aou23] Ali AOUDINI. *Labellisation Des Directions d'un Carrefour*. Rapp. tech. LIMOS, Université Clermont Auvergne, jan. 2023.
- [Ara23] Reza ARABSHEIBANI et al. « From Floorplan to Navigation Concepts : Automatic Generation of Text-based Games ». In : *AGILE : GIScience Series* 4 (juin 2023), p. 1-15. DOI : 10.5194/agile-giss-4-2-2023. URL : <https://agile-giss.copernicus.org/articles/4/2/2023/> (visité le 29/08/2023).
- [Avr04] Marios N. AVRAAMIDES et al. « Functional equivalence of spatial representations derived from vision and language : evidence from allocentric judgments ». eng. In : *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition* 30.4 (juill. 2004), p. 804-814. ISSN : 0278-7393. DOI : 10.1037/0278-7393.30.4.804.
- [Bal16] Jan BALATA et al. « Automatically generated landmark-enhanced navigation instructions for blind pedestrians ». In : *2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*. Sept. 2016, p. 1605-1612.

- [Bal18] Jan BALATA. « Verbal Route Descriptions in Navigation of People with Visual Impairments ». Thèse de doct. Août 2018.
- [BBS20] L. BIAGI, M. A. BROVELLI et L. STUCCHI. « Mapping the Accessibility in OpenStreetMap : A Comparison of Different Techniques ». In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B4-2020* (août 2020), p. 229-236. 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/> (visité le 18/08/2023).
- [Bea06] Linda BEALE et al. « Mapping for Wheelchair Users : Route Navigation in Urban Spaces ». In : *The Cartographic Journal* 43.1 (mars 2006), p. 68-81. ISSN : 0008-7041. DOI : 10.1179/000870406X93517. URL : <https://doi.org/10.1179/000870406X93517> (visité le 15/08/2023).
- [BF77] R. BULLEN et F. FRICKE. « Sound Propagation at a Street Intersection in an Urban Environment ». In : *Journal of Sound and Vibration* 54.1 (8 sept. 1977), p. 123-129. ISSN : 0022-460X. DOI : 10.1016/0022-460X(77)90411-4. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022460X77904114> (visité le 05/12/2023).
- [BKN18] Filip BILJECKI, Kavisha KUMAR et Claus NAGEL. « CityGML Application Domain Extension (ADE) : Overview of Developments ». In : *Open Geospatial Data, Software and Standards* 3.1 (août 2018), p. 13. ISSN : 2363-7501. DOI : 10.1186/s40965-018-0055-6. URL : <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0055-6> (visité le 18/08/2023).
- [BL10] Nick BEARMAN et Andrew LOVETT. « Using Sound to Represent Positional Accuracy of Address Locations ». In : *The Cartographic Journal* 47.4 (nov. 2010), p. 308-314. ISSN : 0008-7041. DOI : 10.1179/000870410X12911302296833. URL : <https://doi.org/10.1179/000870410X12911302296833> (visité le 03/08/2023).
- [BM15] Andrea BALLATORE et Peter MOONEY. « Conceptualising the Geographic World : The Dimensions of Negotiation in Crowdsourced Cartography ». In : *International Journal of Geographical Information Science* 29 (août 2015). DOI : 10.1080/13658816.2015.1076825.
- [Bra08] Jodi BRAZIER. « The Benefits of Using Echolocation to Safely Navigate Through the Environment ». In : *Vision Rehabilitation International* 1.1 (jan. 2008), p. 46-51. DOI : 10.21307/ijom-2008-005. URL : <https://sciendo.com/article/10.21307/ijom-2008-005?tab=figures-tables> (visité le 29/08/2023).
- [Bro12] Anke M. BROCK et al. « Design and User Satisfaction of Interactive Maps for Visually Impaired People ». In : *CoRR* abs/1207.4776 (2012). arXiv : 1207.4776. URL : <http://arxiv.org/abs/1207.4776>.
- [Bro15] Anke M. BROCK et al. « Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People ». In : *Human–Computer Interaction* 30.2 (mars 2015), p. 156-194. ISSN : 0737-0024. DOI : 10.1080/07370024.2014.924412. URL : <https://doi.org/10.1080/07370024.2014.924412> (visité le 05/07/2023).

- [Čer16] Petr ČERVENKA et al. « Blind Friendly Maps ». en. In : *Computers Helping People with Special Needs*. Sous la dir. de Klaus MIESENBERGER, Christian BÜHLER et Petr PENAZ. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 131-138. ISBN : 9783319412672. DOI : 10.1007/978-3-319-41267-2_18.
- [CER22] CEREMA. *Les cheminements des personnes aveugles et malvoyantes*. Jan. 2022, p. 86.
- [CNW17] Seyed Ali CHERAGHI, Vinod NAMBOODIRI et 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)*. 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom). Mars 2017, p. 121-130. DOI : 10.1109/PERCOM.2017.7917858.
- [Cod11] Mihai CODESCU et al. « OSMonto - An Ontology of OpenStreetMap Tags ». In : *State of the Map* (2011).
- [Con18] Jean CONNIER et al. « La Canne Blanche 2SEES : Concept et Expérimentations ». In : oct. 2018.
- [Con19] Angela CONSTANTINESCU et al. « 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. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, oct. 2019, p. 539-541. ISBN : 9781450366762. DOI : 10.1145/3308561.3354618. URL : <https://doi.org/10.1145/3308561.3354618> (visité le 27/07/2023).
- [Dam05] R DAMASCHINI et al. « Electronic Travel Aid for Blind People ». In : AATE. Lille, France, 2005.
- [DCS23] Kauê DE MORAES VESTENA, Silvana CAMBOIM et Daniel SANTOS. « OSM Sidewalkreator : A QGIS Plugin for an Automated Drawing of Sidewalk Networks for OpenStreetMap ». In : *European Journal of Geography* 14 (déc. 2023), p. 66-84. DOI : 10.48088/ejg.k.ves.14.4.066.084.
- [de 23] Alex DE VRIES. « The growing energy footprint of artificial intelligence ». In : *Joule* 7.10 (2023), p. 2191-2194. ISSN : 2542-4351. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435123003653>.
- [DKF23] Lisa DENIS, Jérémie KALSRON et Jean-Marie FAVREAU. « Représenter l'espace Urbain Pour Les Personnes Concernées Par Le Handicap Visuel ». In : 2023.
- [Duh21] Ping-Jung DUH et al. « V-Eye : A Vision-Based Navigation System for the Visually Impaired ». In : *IEEE Transactions on Multimedia* 23 (2021), p. 1567-1580. ISSN : 1941-0077. DOI : 10.1109/TMM.2020.3001500.
- [DWW14] Chaohai DING, Mike WALD et Gary WILLS. « A Survey of Open Accessibility Data ». In : *Proceedings of the 11th Web for All Conference*. W4A '14. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, avr. 2014, p. 1-4. ISBN : 978-1-4503-2651-3. DOI : 10.1145/2596695.2596708. URL : <https://doi.org/10.1145/2596695.2596708> (visité le 15/08/2023).

- [DZ92] Michel DENIS et Michel ZIMMERE. « Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions ». en. In : *Psychological Research* 54.4 (déc. 1992), p. 286-298. ISSN : 1430-2772. DOI : 10.1007/BF01358266. URL : <https://doi.org/10.1007/BF01358266> (visité le 26/07/2023).
- [Fil20] Gauthier FILLIÈRES-RIVEAU et al. « Génération de cartes tactiles photoréalistes pour personnes déficientes visuelles par apprentissage profond ». fr. In : *Revue Internationale de Géomatique* 30.1-2 (jan. 2020), p. 105-126. ISSN : 1260-5875, 2116-7060. DOI : 10.3166/rig.2020.00104. URL : <https://rig.revuesonline.com/articles/lvrig/abs/2020/04/rig00104/rig00104.html> (visité le 05/07/2023).
- [FK22] Jean-Marie FAVREAU et Jérémy KALSRON. « What Are Intersections for Pedestrian Users ? ». In : *AGILE : GIScience Series* 3 (juin 2022), p. 1-15. ISSN : 2700-8150. DOI : 10.5194/agile-giss-3-4-2022. URL : <https://agile-giss.copernicus.org/articles/3/4/2022/> (visité le 15/06/2023).
- [Fog18] Paolo FOGLIARONI et al. « Intersections of Our World ». In : *10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018)*. Sous la dir. de Stephan WINTER, Amy GRIFFIN et Monika SESTER. T. 114. Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs). Dagstuhl, Germany : Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018, 3:1-3:15. ISBN : 978-3-95977-083-5. DOI : 10.4230/LIPIcs.GISCIENCE.2018.3. URL : <https://drops.dagstuhl.de/entities/document/10.4230/LIPIcs.GISCIENCE.2018.3>.
- [Fot22] Aikaterini FOTEINOU et al. « Sonification of Spatial Data : An Online Audiovisual Cartographic Representation of Fire Incidents ». In : *AGILE : GIScience Series* 3 (juin 2022). ADS Bibcode : 2022AGILE...3...35F, p. 35. ISSN : 2700-8150. DOI : 10.5194/agile-giss-3-35-2022. URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022AGILE...3...35F> (visité le 04/08/2023).
- [Gam94] Erich GAMMA et al. *Design Patterns : Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 1er édition. Boston, Mass. Munich : Addison Wesley, 31 oct. 1994. 416 p. ISBN : 978-0-201-63361-0.
- [Gau06] Florence GAUNET. « Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas ». en. In : *Universal Access in the Information Society* 4.4 (mai 2006), p. 338-353. ISSN : 1615-5289, 1615-5297. DOI : 10.1007/s10209-003-0086-2. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10209-003-0086-2> (visité le 21/10/2020).
- [GL10] Nicholas GIUDICE et R.G. LONG. « Establishing and Maintaining Orientation for Orientation and Mobility ». In : jan. 2010, p. 45-62.
- [Gol98] Reginald G. GOLLEDGE et al. « A Geographical Information System for a GPS Based Personal Guidance System ». In : *International Journal of Geographical Information Science* 12.7 (nov. 1998), p. 727-749. ISSN : 1365-8816. DOI : 10.1080/136588198241635. URL : <https://doi.org/10.1080/136588198241635> (visité le 28/08/2023).
- [Goo07] Michael F. GOODCHILD. « Citizens as Sensors : The World of Volunteered Geography ». In : *GeoJournal* 69.4 (nov. 2007), p. 211-221. ISSN : 0343-2521, 1572-9893. DOI : 10.1007/s10708-007-9111-y. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s10708-007-9111-y> (visité le 17/08/2023).

- [GP12] Gerhard GRÖGER et Lutz PLÜMER. « CityGML – Interoperable Semantic 3D City Models ». In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71 (juill. 2012), p. 12-33. ISSN : 0924-2716. DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271612000779> (visité le 18/08/2023).
- [Gue17] João GUERREIRO et al. « 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*. ASSETS '17 : The 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. Baltimore Maryland USA : ACM, oct. 2017, p. 280-289. ISBN : 978-1-4503-4926-0. DOI : 10.1145/3132525.3132545. URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3132525.3132545> (visité le 26/07/2023).
- [Gut19] David A. GUTH et al. « An Intersection Database Facilitates Access to Complex Signalized Intersections for Pedestrians with Vision Disabilities ». en. In : *Transportation Research Record* 2673.2 (fév. 2019), p. 698-709. ISSN : 0361-1981. DOI : 10.1177/0361198118821673. URL : <https://doi.org/10.1177/0361198118821673> (visité le 19/07/2023).
- [GW23] Maxime GUILLAUMIN et Shisong WANG. *Description Du Chemin Entre Les Carrefours*. Rapp. tech. LIMOS, Université Clermont Auvergne, mars 2023.
- [Hom17] Anthony HOMBIAT. « OF4OSM : un méta-modèle pour structurer la folksonomie d'OpenStreetMap en une nouvelle ontologie ». Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, 24 fév. 2017. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01683028> (visité le 06/08/2020).
- [Jac98] R. Dan JACOBSON. « Cognitive Mapping Without Sight : Four Preliminary Studies of Spatial Learning ». In : *Journal of Environmental Psychology* 18.3 (sept. 1998), p. 289-305. ISSN : 0272-4944. DOI : 10.1006/jenvp.1998.0098. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494498900986> (visité le 29/08/2023).
- [Jia23a] Yuhao JIANG. « Tactile street intersection maps for people with visual impairments : exploring the tactile map design and visualizing finger movements to analyze the map reading process ». Theses. Université Gustave Eiffel, nov. 2023. URL : <https://theses.hal.science/tel-04500971>.
- [Jia23b] Yuhao JIANG et al. « Semi-automated Pipeline to Produce Customizable Tactile Maps of Street Intersections for People with Visual Impairments ». In : *AGILE : GIScience Series* 4 (juin 2023), p. 1-8. DOI : 10.5194/agile-giss-4-29-2023.
- [Jos16] Didier JOSSELIN et al. « Sonorous cartography for sighted and blind people ». en. In : juin 2016. URL : <https://hal.science/hal-01338081> (visité le 12/07/2023).
- [Ker16] Régis KERN. « Cartographie et Malvoyance - Du Papier Au Numérique ». In : *Cartes & Géomatique* (déc. 2016), p. 229-230, 167-174.

- [KFT22] Jérémie KALSRON, Jean-Marie FAVREAU et Guillaume TOUYA. « CrossroadsDescriptor – Automatic Textual Description of OpenStreetMap Intersections ». In : *AGILE : GIScience Series 3* (15 juin 2022), p. 40. DOI : 10.5194/agile-giss-3-40-2022. URL : <https://uca.hal.science/hal-03694759> (visité le 15/06/2023).
- [KNC08] Vladimir KULYUKIN, John NICHOLSON et Daniel COSTER. « ShopTalk : Toward independent shopping by people with visual impairments ». In : oct. 2008, p. 241-242. DOI : 10.1145/1414471.1414518.
- [Kry94] JOHN B. KRYGIER. « Chapter 8 - Sound and Geographic Visualization ». en. In : sous la dir. d'ALAN M. MACEACHREN et D. R. FRASER TAYLOR. T. 2. *Visualization in Modern Cartography*. Academic Press, jan. 1994, p. 149-166. DOI : 10.1016/B978-0-08-042415-6.50015-6. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080424156500156> (visité le 03/08/2023).
- [KSS22] Bineeth KURIAKOSE, Raju SHRESTHA et Frode Eika SANDNES. « Tools and Technologies for Blind and Visually Impaired Navigation Support : A Review ». In : *IETE Technical Review* 39.1 (jan. 2022), p. 3-18. ISSN : 0256-4602. DOI : 10.1080/02564602.2020.1819893. URL : <https://doi.org/10.1080/02564602.2020.1819893> (visité le 28/08/2023).
- [LG01] Steven LANDAU et K. GOURGEY. « Development of a Talking Tactile Tablet ». In : *Information Technology and Disabilities* (avr. 2001). URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-a-Talking-Tactile-Tablet-Landau-Gourgey/46b57cad3779295df806d53999619465ba8b2024> (visité le 04/08/2023).
- [LHM99] Kristin L. LOVELACE, Mary HEGARTY et Daniel R. MONTELLO. « Elements of Good Route Directions in Familiar and Unfamiliar Environments ». en. In : *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science*. Sous la dir. de Christian FREKSA et David M. MARK. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg : Springer, 1999, p. 65-82. ISBN : 9783540483847. DOI : 10.1007/3-540-48384-5_5.
- [Lop18] Pablo Alvarez LOPEZ et al. « Microscopic Traffic Simulation Using SUMO ». In : *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Nov. 2018, p. 2575-2582. DOI : 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [Löt94] Jürgen LÖTZSCH. « Computer-aided access to tactile graphics for the blind ». en. In : *Computers for Handicapped Persons*. Sous la dir. de Wolfgang L. ZAGLER, Geoffrey BUSBY et Roland R. WAGNER. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg : Springer, 1994, p. 575-581. ISBN : 9783540489894. DOI : 10.1007/3-540-58476-5_188.
- [Mie04] 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.

- [Min10] Kazunori MINATANI et al. « Tactile Map Automated Creation System to Enhance the Mobility of Blind Persons—Its Design Concept and Evaluation through Experiment ». en. In : *Computers Helping People with Special Needs*. Sous la dir. de Klaus MIESENBERGER et al. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010, p. 534-540. ISBN : 9783642141003. DOI : 10.1007/978-3-642-14100-3_80.
- [ML15] Paul MOLINS et Guy LAPALME. « JSrealB : A Bilingual Text Realizer for Web Programming ». In : *Proceedings of the 15th European Workshop on Natural Language Generation (ENLG)*. Sous la dir. d'Anya BELZ et al. Brighton, UK : Association for Computational Linguistics, sept. 2015, p. 109-111. DOI : 10.18653/v1/W15-4719. URL : <https://aclanthology.org/W15-4719>.
- [MLG06] Joshua A. MIELE, Steven LANDAU et Deborah GILDEN. « Talking TMAP : Automated generation of audio-tactile maps using Smith-Kettlewell's TMAP software ». en. In : *British Journal of Visual Impairment* 24.2 (mai 2006), p. 93-100. ISSN : 0264-6196. DOI : 10.1177/0264619606064436. URL : <https://doi.org/10.1177/0264619606064436> (visité le 05/07/2023).
- [Mob17] Amin MOBASHERI et al. « Are Crowdsourced Datasets Suitable for Specialized Routing Services? Case Study of OpenStreetMap for Routing of People with Limited Mobility ». In : *Sustainability* 9.6 (6 juin 2017), p. 997. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su9060997. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/6/997> (visité le 07/04/2022).
- [Mul20] Julie MULET et al. « Évaluation d'un dispositif audio-tangible pour l'apprentissage spatial chez les enfants déficients visuels ». In : *11ème conférence de l'IFRATH sur les technologies d'assistance : Technologies pour l'autonomie et l'inclusion (Handicap 2020)*. Sous la dir. de C. JOST et G. UZAN. T. Session 6 : Outils pédagogiques pour personnes aveugles. Institut Fédératif de Recherche sur les Aides Techniques pour personnes Handicapées (IFRATH). Paris (en distanciel), France : IFRATH, nov. 2020, p. 157-162. URL : <https://hal.science/hal-02926462>.
- [Pig23] Caroline PIGEON et al. *Étude Homère - Étude nationale sur la déficience visuelle*. Rapp. tech. 2023.
- [PM85] J. Douglas PORTEOUS et Jane F. MASTIN. « Soundscape ». In : *Journal of Architectural and Planning Research* 2.3 (1985), p. 169-186. ISSN : 0738-0895.
- [PSG03] M.P. PALACIO, D. SOL et J. GONZALEZ. « Graph-Based Knowledge Representation for GIS Data ». In : *Proceedings of the Fourth Mexican International Conference on Computer Science, 2003. ENC 2003*. Proceedings of the Fourth Mexican International Conference on Computer Science, 2003. ENC 2003. Sept. 2003, p. 117-124. DOI : 10.1109/ENC.2003.1232884.
- [RC19] Agathe RATELLE et Julie-Anne COUTURIER. *Manuel d'intervention en orientation et mobilité*. Français. PU Montréal, jan. 2019. ISBN : 978-2-7606-3905-8.
- [Ref12] Pierre REFUVEILLE. « Les Nouvelles Technologies à l'usage Des Malvoyants et Des Non-Voyants ». In : *Revue Francophone d'Orthoptie* 5.1 (jan. 2012), p. 29-39. ISSN : 1876-2204. DOI : 10.1016/j.rfo.2012.03.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876220412000143> (visité le 28/08/2023).

- [Rei07] Ehud REITER. « An Architecture for Data-to-Text Systems ». In : *Proceedings of the Eleventh European Workshop on Natural Language Generation (ENLG 07)*. Sous la dir. de Stephan BUSEMANN. Saarbrücken, Germany : DFKI GmbH, juin 2007, p. 97-104. URL : <https://aclanthology.org/W07-2315>.
- [SF18] Joram SCHITO et Sara Irina FABRIKANT. « Exploring maps by sounds : using parameter mapping sonification to make digital elevation models audible ». In : *International Journal of Geographical Information Science* 32.5 (mai 2018), p. 874-906. ISSN : 1365-8816. DOI : 10.1080/13658816.2017.1420192. URL : <https://doi.org/10.1080/13658816.2017.1420192> (visité le 12/07/2023).
- [Shi22] Kiyoung SHIN et al. « Outdoor Localization Using BLE RSSI and Accessible Pedestrian Signals for the Visually Impaired at Intersections ». In : *Sensors* 22.1 (1 jan. 2022), p. 371. ISSN : 1424-8220. DOI : 10.3390/s22010371. URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/1/371> (visité le 28/08/2023).
- [ŠM16] Radim ŠTAMPACH et Eva MULÍČKOVÁ. « Automated generation of tactile maps ». In : *Journal of Maps* 12.sup1 (nov. 2016), p. 532-540. ISSN : null. DOI : 10.1080/17445647.2016.1196622. URL : <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1196622> (visité le 05/07/2023).
- [TG14] Guillaume TOUYA et Jean-François GIRRES. « Generalising Unusual Map Themes from OpenStreetMap ». In : *17th ICA Workshop on Map Generalisation and Multiple Representation*. Vienne, Austria, sept. 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02280105> (visité le 04/04/2022).
- [Tho21] Cathy THOMÉ. *Faciliter et Sécuriser Les Déplacements Extérieurs Pour Les Personnes En Situation de Handicap Visuel via Un Entrainement Auditif*. LIMOS, Université Clermont Auvergne, sept. 2021.
- [Tou19] Guillaume TOUYA et al. « Automatic derivation of on-demand tactile maps for visually impaired people : first experiments and research agenda ». In : *International Journal of Cartography* 5.1 (jan. 2019), p. 67-91. ISSN : 2372-9333. DOI : 10.1080/23729333.2018.1486784. URL : <https://doi.org/10.1080/23729333.2018.1486784> (visité le 05/07/2023).
- [TSA20] Johannes TRÖGER, Sarah SCHNEBELT et Jan ALEXANDERSSON. « Modelling the Creation of Verbal Indoor Route Descriptions for Visually Impaired Travellers ». en. In : sous la dir. de Sara PAIVA. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Cham : Springer International Publishing, 2020, p. 355-377. ISBN : 9783030164508. DOI : 10.1007/978-3-030-16450-8_15. URL : https://doi.org/10.1007/978-3-030-16450-8_15 (visité le 27/07/2023).
- [Vit22] Stelios VITALIS et al. « From Road Centrelines to Carriageways—A Reconstruction Algorithm ». In : *PLOS ONE* 17.2 (22 fév. 2022), e0262801. ISSN : 1932-6203. DOI : 10.1371/journal.pone.0262801. URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0262801> (visité le 08/04/2022).
- [Wad21] Eunice Guédaliah WADJOM KAMMEGNE. *Models Transformation and Data Integration in OpenStreetMap for Accessibility : Feasibility Study from the Geostandard*. Clermont-Ferrand, France : LIMOS, Université Clermont Auvergne, 2021.

- [Wat14] Tetsuya WATANABE et al. « Tactile Map Automated Creation System Using OpenStreetMap ». en. In : *Computers Helping People with Special Needs*. Sous la dir. de Klaus MIESENBERGER et al. Lecture Notes in Computer Science. Cham : Springer International Publishing, 2014, p. 42-49. ISBN : 9783319085999. DOI : 10.1007/978-3-319-08599-9_7.
- [Whe20] Bradley WHEELER et al. « Personalized Accessible Wayfinding for People with Disabilities through Standards and Open Geospatial Platforms in Smart Cities ». In : *Open Geospatial Data, Software and Standards* 5.1 (déc. 2020), p. 2. ISSN : 2363-7501. DOI : 10.1186/s40965-020-00075-5. URL : <https://opengeospatialdata.springeropen.com/articles/10.1186/s40965-020-00075-5> (visité le 18/08/2023).
- [Whi23] Jules WHITE et al. *A Prompt Pattern Catalog to Enhance Prompt Engineering with ChatGPT*. 2023. arXiv : 2302.11382 [cs.SE].
- [WM19] Jakub WABIŃSKI et Albina MOŚCICKA. « Automatic (Tactile) Map Generation—A Systematic Literature Review ». en. In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8.7 (juill. 2019), p. 293. ISSN : 2220-9964. DOI : 10.3390/ijgi8070293. URL : <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/7/293> (visité le 04/07/2023).
- [WMT22] Jakub WABIŃSKI, Albina MOŚCICKA et Guillaume TOUYA. « Guidelines for Standardizing the Design of Tactile Maps : A Review of Research and Best Practice ». In : *The Cartographic Journal* 59.3 (juill. 2022), p. 239-258. ISSN : 0008-7041. DOI : 10.1080/00087041.2022.2097760. URL : <https://doi.org/10.1080/00087041.2022.2097760> (visité le 05/07/2023).
- [Ye23] Hongbin YE et al. *Cognitive Mirage : A Review of Hallucinations in Large Language Models*. 2023. arXiv : 2309.06794 [cs.CL].