







# UNIVERSITÉ DE TOURS

## ÉCOLE DOCTORALE MIPTIS

**Equipe BDTLN**
**LIFAT (EA 6300)**

# THÈSE présentée par :

Raphaël Bres

soutenue le : **3 décembre 2024**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Tours**

Discipline/ Spécialité : **Informatique**

# Modélisation et évolution du réseau cyclable

**THÈSE dirigée par :**

| | |
|---|---|
| **M. de Runz Cyril** | Maître de conférences HDR, Univ. de Tours |
| **Mme. Olteanu Raimond Ana-Maria** | Directrice de recherches, Université Gustave Eiffel |

**Encadrée par :**

| | |
|---|---|
| **Mme. Peralta Veronika** | Maîtresse de conférences HDR, Univ. de Tours |
| **M. Le Guilcher Arnaud** | Ingénieur de recherche, Université Gustave Eiffel |

**RAPPORTEURS :**

| | |
|---|---|
| **M. Boucelma Omar** | Professeur, Aix-Marseille Université |
| **M. Josselin Didier** | Professeur, Avignon Université |

---

**JURY :**

| | |
|---|---|
| **M. Boucelma Omar** | Professeur, Aix-Marseille Université |
| **M. Josselin Didier** | Professeur, Avignon Université |
| **Mme. Davoine Paule-Annick** | Professeur, Université Grenoble Alpes |
| **Mme. Del Mondo Géraldine** | Mâitresse de conférences, INSA Rouen Normandie |
| **Mme. Peralta Veronika** | Maîtresse de conférences HDR, Univ. de Tours |
| **M. Le Guilcher Arnaud** | Ingénieur de recherches, Université Gustave Eiffel |
| **Mme. Olteanu Raimond Ana-Maria** | Directrice de recherches, Université Gustave Eiffel |
| **M. de Runz Cyril** | Maître de conférences HDR, Univ. de Tours |
| Invité : | |
| **M. Devogele Thomas** | Professeur, Univ. de Tours |

## Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu l'ensemble de mes encadrants de thèse, à savoir Cyril de Runz, Ana-Maria Olteanu Raimond, Veronika Peralta, Arnaud Le Guilcher et Thomas Devogèle pour leur disponibilités et leurs éclairages apportés à mes recherches durant ces trois années de thèse.

Je remercie aussi l'ensemble de mes collègues et amis jeunes chercheurs avec qui nous avons eu de nombreuses discussions (sur nos sujets de recherche mais pas que) très intéressantes. Parmi ceux qui sont encore doctorant, je ne louperai pas vos soutenance de thèse au moins en visio ! Parmi eux, je remercie particulièrement Ben pour le fait qu'on se soit motivé mutuellement dans la rédaction de nos manuscrits, sans oublier les nombreux "bons repas" du midi partagés ensemble. Je remercie également Fodil, Youssef, Hassan, Dhouha, Guillaume T, Hiba, Guillaume A et Yanis pour leur bonne compagnie dans un bureau que nous avons partagé à un moment et tous ses bons moments passés ensemble. Une mention spéciale pour Adam et Nicolas R qui sont les deux seuls à m'avoir suivi sur des parcours à vélo. Du côté du LASTIG, merci à Bruno pour m'avoir montré un coin du Bois de Vincennes que je ne connaissais pas beaucoup à travers quelques sorties de course à pied.

Je remercie de manière générale l'ensemble des membres du LIFAT et du LASTIG durant ces trois dernières années qui ont parfaitement faciliter mon intégration dans les deux structures. J'ai vraiment eu l'impression d'avoir deux bureaux durant l'ensemble de ces trois ans. Plus particulièrement, un grand merci à Mohamed, Nicolas L et Jean-Yves pour m'avoir lancé dans mes premiers cours à l'université. Je remercie aussi chaleureusement la direction de ces deux laboratoires mais aussi celle des deux équipes où j'ai été intégré, me permettant d'avoir tout ce dont j'avais besoin pour mener à bien ma thèse.

Je remercie également les deux étudiants qui ont dû me suivre dans mes bizarreries sur les données pour le cyclisme, à savoir Matthieu et Boubacar. J'ai vraiment apprécié le travail avec vous deux.

Je remercie également mes amis Hugo, Bastien, Rachid, Teiki, François et Guillaume qui m'ont permis par moments de sortir de ma bulle autour de mes travaux de thèse. Nos week-end festifs à travers le sud de la France (et de la Suisse) ont grandement permis de me remobiliser par la suite sur mes objectifs professionnels.

Je remercie de tout cœur ma famille au sens large du terme qui m'a toujours soutenu, même en étant loin de moi.

Je remercie aussi les membres de mon jury de thèse ainsi que ceux de mon comité de suivi individuel pour avoir relu mes travaux et proposé de nombreuses perspectives très intéressantes à ceux-ci.

Pour finir, j'aimerai remercier Jean-François Girres qui m'a à la fois indiqué cette offre de thèse et renforcé dans mon envie d'y candidater. Sans lui, ces trois années n'auraient sûrement pas eu lieu.

# Table des matières

**Liste des Acronymes** **vii**

**1 Introduction** **1**
1.1 Contexte général . . . 1
1.2 Contexte applicatif . . . 2
1.2.1 IGN . . . 2
1.2.2 Région Centre Val de Loire . . . 3
1.2.3 OpenStreetMap . . . 4
1.3 Contexte scientifique et problématiques . . . 5
1.3.1 Modélisation des données routières pour le cyclisme . . . 5
1.3.2 Peuplement d'une BDRM . . . 7
1.3.3 Analyse de la fraîcheur du réseau cyclable par le prisme de l'évolution . . . 8
1.4 Contributions . . . 10
1.5 Plan de la thèse . . . 11

**I État de l'art** **13**

**2 Le réseau cyclable : existant, usage et modélisation** **17**
2.1 Le réseau cyclable dans le monde réel . . . 17
2.2 L'utilisation du réseau cyclable . . . 18
2.2.1 Profils de cyclistes . . . 19
2.2.2 Cyclabilité . . . 21
2.3 Les BDRM et le réseau cyclable . . . 24
2.4 Modélisation du réseau cyclable . . . 29
2.5 Conclusion . . . 31

**3 Qualité des données** **33**
3.1 Définition de la qualité des données . . . 33
3.1.1 Qualité des données de manière générale . . . 34
3.1.2 Qualité des données géographiques . . . 36
3.1.3 Fraîcheur des données . . . 38
3.2 Analyse de la qualité des données dans OSM . . . 40
3.2.1 Qualité intrinsèque . . . 40
3.2.2 Qualité extrinsèque . . . 41
3.2.3 Analyse de la fraîcheur et de l'évolution des données OSM . . . 42
3.3 Conclusion . . . 45

**4 Outils mathématiques pour le réseau cyclable 47**
4.1 Graphe . . . 47
4.1.1 Définition générale . . . 48
4.1.2 Graphes spatio-temporels . . . 49
4.1.3 Graphe multiplexe . . . 51
4.2 Algorithmes de plus courts chemins . . . 52
4.2.1 Algorithmes utilisant un graphe orienté valué . . . 53
4.2.2 Algorithmes prenant en compte le contexte utilisateur . . . 56
4.3 Simulation et échantillonnage . . . 57
4.3.1 Méthodes d'échantillonnage . . . 57
4.3.2 Données nécessaires à l'échantillonnage . . . 59
4.4 Conclusion . . . 61

**II Le réseau cyclable : définition et modélisation 65**

**5 Le réseau cyclable 69**
5.1 Définition du réseau cyclable . . . 69
5.1.1 Infrastructures dédiées au cyclisme . . . 71
5.1.2 Infrastructures dédiées aux piétons . . . 75
5.1.3 Routes sans aménagement spécifique pour les cyclistes . . . 76
5.1.4 Voies exclues du réseau cyclable . . . 77
5.2 Des usagers avec des besoins différents . . . 78
5.2.1 Les usages du vélo . . . 78
5.2.2 Adaptation à l'usager . . . 80
5.3 Conclusion . . . 81

**6 Modèle conceptuel du réseau cyclable 83**
6.1 Présentation de la BDRM . . . 83
6.1.1 Infrastructures routières . . . 83
6.1.2 Environnement des infrastructures routières . . . 87
6.1.3 Gestion de l'historique . . . 88
6.2 Intérêts du modèle conceptuel proposé . . . 90
6.3 Conclusion . . . 92

**7 Instanciation de la BDRM adaptée 95**
7.1 Exemples fictifs illustratifs . . . 96
7.1.1 Premier exemple, snapshot 1 . . . 97
7.1.2 Premier exemple, snapshot 2 . . . 98
7.1.3 Deuxième exemple . . . 100
7.2 Peuplement à partir de la BDTOPO® . . . 105
7.2.1 Règles d'nstanciation . . . 105
7.2.2 Illustration avec les exemples . . . 116
7.2.3 Données utilisées . . . 120
7.2.4 Résultats et discussion . . . 123

7.3 Peuplement avec OSM . . . 124
7.3.1 Règles d'instanciation . . . 124
7.3.2 Illustration avec les exemples . . . 129
7.3.3 Données utilisées . . . 130
7.3.4 Résultats et discussion . . . 131
7.4 Comparaison des deux peuplements . . . 132
7.4.1 Qualité des données . . . 132
7.4.2 Qualité du réseau cyclable . . . 133
7.4.3 Complémentarité des deux peuplements . . . 133
7.5 Conclusion . . . 134

**III Évolution du réseau cyclable dans OSM 139**

**8 Analyse de l'évolution d'un réseau 143**
8.1 Graphe multiplexe pour mesurer l'évolution des données OSM . . . 143
8.1.1 Présentation du graphe multiplexe . . . 144
8.1.2 Similitudes et différences entre la BDRM adaptée et le graphe multiplexe . . . 147
8.2 Analyse de l'évolution du réseau cyclable par tronçons . . . 148
8.2.1 Principe général . . . 148
8.2.2 Résultats attendus . . . 149
8.3 Analyse par itinéraires . . . 150
8.3.1 Principe général . . . 151
8.3.2 Sorties de l'analyse . . . 153
8.4 Conclusion . . . 155

**9 Expérimentation sur la région Centre Val-de-Loire 157**
9.1 Paramétrage . . . 157
9.1.1 Snapshots . . . 157
9.1.2 Profil cycliste dans l'outil de traçage d'itinéraire . . . 158
9.1.3 Définition de seuils . . . 159
9.2 Résultats . . . 160
9.2.1 Approche par tronçon de route . . . 160
9.2.2 Approche par itinéraires . . . 164
9.3 Conclusion . . . 171

**10 Conclusion 179**
10.1 Conclusion générale . . . 179
10.2 Perspectives . . . 182

**Appendices** **185**

**A Analyse de l'évolution du réseau cyclable** **187**
A.1 Paramétrage de la distance au réseau . . . . . 187
A.2 Analyse par tronçon de route : matrices de confusion . . . . . 187
A.3 Analyse par itinéraires : indicateur de centralité pour 2020 et 2021 . 192

**B Dictionnaire de la BDRM adaptée au cyclisme** **203**
B.1 Voie . . . . . 203
B.2 Tronçon . . . . . 203
B.3 Divise . . . . . 204
B.4 Itinéraire . . . . . 204
B.5 Fait partie . . . . . 205
B.6 Usager . . . . . 205
B.7 Sens . . . . . 205
B.8 Utilise . . . . . 205
B.9 Objet ponctuel . . . . . 205
B.10 Noeud du réseau . . . . . 205
B.11 Non communication . . . . . 206
B.12 Point d'intérêt . . . . . 206
B.13 Entrave . . . . . 206
B.14 Parkings cyclistes . . . . . 206
B.15 Modification . . . . . 207
B.16 creationObjet . . . . . 207
B.17 Suppression . . . . . 207
B.18 Changement attribut . . . . . 208

**C Tableaux complets du chapitre 7** **209**

**Bibliographie** **219**

# Liste des Acronymes

**API** Application Programming Interface . . . . . 27
**BDRM** Base de données de réseaux de mobilités . . . . . 5
**CEREMA** Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement . . . . . 36
**CRP** Customizable route planning . . . . . 53
**CVCB** Chaussée à Voie Centrale Banalisée . . . . . 70
**EDPM** Engin de déplacement personnel motorisé . . . . . 5
**ERP** Établissement recevant du public . . . . . 25
**GNSS** Global Navigation Satellite System . . . . . 30
**GPS** Global Positionning System . . . . . 18
**IGN** Institut National de l'information Géographique et Forestière . . . . 2
**LIDAR** LIght Detection And Ranging . . . . . 30
**MLD** Multi-layer Dijkstra . . . . . 55
**OSHDB** OpenStreetMap History Data Analysis . . . . . 43
**OSM** OpenStreetMap . . . . . 2
**OSRM** Open-Source Routing Machine . . . . . 29
**SIG** Système d'Informations Géographiques . . . . . 96
**SRADDET** Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires . . . . . 4
**VGI** Information Géographique Volontaire . . . . . 4

Chapitre 1

# Introduction

**Sommaire**


**1.1 Contexte général . . . . . 1**
**1.2 Contexte applicatif . . . . . 2**
1.2.1 IGN . . . . . 2
1.2.2 Région Centre Val de Loire . . . . . 3
1.2.3 OpenStreetMap . . . . . 4
**1.3 Contexte scientifique et problématiques . . . . . 5**
1.3.1 Modélisation des données routières pour le cyclisme . . . . . 5
1.3.2 Peuplement d'une BDRM . . . . . 7
1.3.3 Analyse de la fraîcheur du réseau cyclable par le prisme de l'évolution . . . . . 8
**1.4 Contributions . . . . . 10**
**1.5 Plan de la thèse . . . . . 11**


## 1.1 Contexte général

Le cyclisme se développe de nos jours comme une alternative de mobilité attrayante à l'heure où les citoyens cherchent à éviter d'emprunter leur voiture et réduire leur impact environnemental [1] [Pucher *et al.* 2010]. Cela est aussi un bon moyen pour un usager de concilier ses mobilités quotidiennes [Pucher & Buehler 2016] avec une activité physique bénéfique pour la santé [Oja *et al.* 2011]. Cet essor du cyclisme s'explique aussi par l'augmentation rapide des infrastructures cyclables, améliorant la sécurité des cyclistes [Li *et al.* 2025]. Le vélo est aussi reconnu pour être un moyen de transport beaucoup moins cher que la voiture [Gössling & Choi 2015], ce qui amène aussi beaucoup de personnes dans une situation financière précaire à privilégier ce moyen de transport. Cependant, [Brezina *et al.* 2022] montrent que ces infrastructures se développent plus lentement en zones rurales où la voiture est toujours le moyen de transport principal de la majorité des habitants [Poltimäe *et al.* 2022]. Cela amène de potentiels nouveaux cyclistes à conserver leur voiture. Améliorer davantage les infrastructures à disposition des cyclistes est donc un enjeu majeur pour les collectivités.

1. https://www.institutparisregion.fr/mobilite-et-transports/deplacements/enquete-regionale-sur-la-mobilite-des-franciliens/

Ces nombreux changements dans le monde réel amènent le questionnement de cette thèse sur la représentation et l'analyse de ces changements dans les bases de données géographiques dédiées à la mobilité.

## 1.2 Contexte applicatif

Avec l'essor du cyclisme, l'Institut National de l'information Géographique et Forestière (IGN) et la Région Centre Val-de-Loire ont tous les deux un besoin de suivre ce-dernier et ont co-financé cette thèse. L'IGN souhaite améliorer leur produit topographique concernant l'usage du vélo. La Région Centre Val-de-Loire souhaite, quant à elle, s'assurer que son réseau cyclable touristique soit bien représenté dans les bases de données de mobilités. Dans le même temps, le projet OpenStreetMap (OSM) se développe comme une source de données intéressante pour récupérer un réseau de mobilités quasiment complet. Nous allons maintenant présenter ces deux organismes ainsi que leurs attentes autour de cette thèse. Ensuite, nous présentons rapidement OpenStreetMap et ses principes majeurs.

### 1.2.1 IGN

L'Institut National de l'information Géographique et Forestière (IGN) est l'agence nationale de cartographie en France. Il a une mission de service public consistant, entre autres, à produire un ensemble de données géographiques et forestières pour la France entière et à maintenir ces données à jour.

Parmi les jeux de données actuellement fournis au grand public par l'IGN, la BDTOPO® est censée représenter tout objet visible correspondant aux spécifications [IGN 2021] se trouvant sur le territoire. Cela inclut les bâtiments, les routes, les établissements recevant du public ou encore les cours d'eau. Concernant les routes, les données représentées ont d'abord été tournées vers les voitures et les piétons. Cependant, avec l'essor de nouvelles mobilités comme le vélo ou les engins de déplacement personnels motorisés (EDPM), une information attributaire supplémentaire qui n'était pas présente dans les données d'origine est requise. L'IGN a mis en place une plateforme en ligne, *Espace Collaboratif*[2], destinée aux partenaire pour remonter des changements, améliorer et enrichir la BDTOPO®. L'IGN a aussi mis en place une politique d'ajout d'attributs dans la BDTOPO® dès lors qu'un partenaire dispose d'une information intéressante sur une petite partie du territoire et en s'inspirant de bases de données extérieures comme Vélo & Territoires par exemple. Ces ajouts d'attributs souffrent cependant d'un problème de complétude car les valeurs ne sont remplies que pour la zone où elles existent déjà. Par exemple, si un attribut est ajouté par un partenaire de la région Normandie, il n'y aura potentiellement pas de campagne spécifique pour peupler cet attribut pour la région Centre Val-de-Loire. Par contre, l'IGN peut intégrer des données fournies par une collectivité territoriale sur l'ensemble ou une partie du territoire régional. Une campagne

2. https://espacecollaboratif.ign.fr/

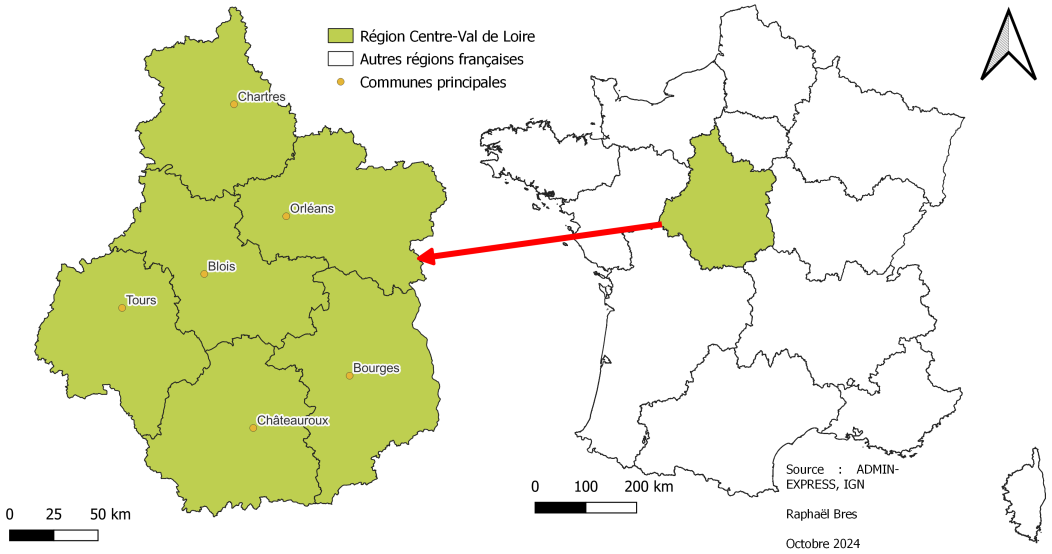



FIGURE 1.1 – Localisation de la région Centre Val-de-Loire

terrain pour peupler ces attributs serait beaucoup trop coûteuse par rapport au gain en information pour la BDTOPO® à l'échelle nationale.

Cette stratégie de co-production des données géographiques vient renforcer la stratégie de l'IGN de co-produire un bien commun avec des partenaires. Ceci s'est concrétisée à partir du début de l'année 2021 qui a marqué l'ouverture des données de l'IGN sous license ETALAB.

L'IGN attend de notre part des propositions pour améliorer la représentation, l'exhaustivité et l'actualité de l'infrastructure cyclable qui fait partie de l'infrastructure routière de la BDTOPO®.

### 1.2.2 Région Centre Val de Loire

Située au centre de la France métropolitaine comme montré sur la figure 1.1, la région Centre Val-de-Loire est constituée de deux grandes villes se trouvant parmi les 22 plus grandes métropoles de France (Tours et Orléans), de plusieurs villes de taille moyenne (Blois, Bourges, Chartres etc.) et de nombreux territoires ruraux.

Dans une partie de ces territoires ruraux, beaucoup de châteaux anciens avec une grande renommée attirent de nombreux touristes chaque été. Dernièrement, le tourisme dans la région s'est de plus en plus orienté vers le "slow tourisme" encouragé par le développement du vélo [Indigo & Vertigo 2020, Derman & Keles 2023]. Ce nouveau tourisme est amené en grande partie par un grand itinéraire cyclable traversant la région qui est *La Loire à Vélo*. Une portion de cet itinéraire fait partie du réseau EuroVélo qui contribue aussi à la popularité internationale de la région.

La région Centre Val-de-Loire souhaite s'assurer que les attraits touristiques que sont les infrastructures cyclables soient bien renseignés puis exploités dans les bases

de données géographiques de mobilités pour qu'un public de plus en plus large vienne visiter la région et ainsi augmenter le chiffre d'affaires de ses commerces.

De plus, le vélo se développe aussi très rapidement dans les métropoles car la crise de la COVID et une prise de conscience environnementale ont amené beaucoup de personnes à fuir les transports en commun et la voiture au profit de la marche, du vélo et des EDPM. La région commence à adopter une position de développement du cyclisme dans le cadre des déplacements domicile/travail ou école comme mentionné dans son schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET)) [RCVL 2019], amenant de nombreuses personnes à privilégier le vélo lorsque c'est possible. Cela confirme le fait que la région souhaite développer le vélo dans le monde rural comme le montre l'aide à l'achat proposée dans ses 57 territoires ruraux en 2023 [3]. Le SRADDET de la région Centre Val-de-Loire fixe comme objectif d'augmenter la part modale du cyclisme à 9% d'ici 2025 tout en améliorant le transport par rails afin de trouver des alternatives à la voiture.

Afin de répondre aux attentes de la région Centre Val-de-Loire, les applications de nos contributions sont portées sur l'ensemble de la région ou une partie de celle-ci. Comme démontré ci-dessus, ces besoins pourraient être aussi bénéfiques pour les divisions administratives de cette région.

### 1.2.3 OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif où le but est de créer une carte du monde la plus fidèle possible au niveau des infrastructures (par exemple les routes, les bâtiments, l'occupation du sol etc.). C'est un projet de sciences citoyennes qui représente un parfait exemple de science données géographiques volontaires (Information Géographique Volontaire (VGI), [Goodchild 2007]). Aujourd'hui, OSM est composé de plusieurs centaines de millions d'objets (des nodes, des ways et des relations) à travers le monde dont environ 255 millions de tronçons de route selon OSM taginfo [4] en 2024. Chaque objet dispose de tags qui sont des couples clé/valeur donnant une information à propos de cet objet. Les tags et la géométrie peuvent être modifiés, résultant en un changement de version de l'objet concerné. Plusieurs changements réalisés par un même contributeur au même moment (dans la même session de connexion) sont groupés entre eux grâce à un identifiant de *changeset*. Les données d'OSM sont vitales dans certains pays ne disposant pas d'une source de données gratuites. Cependant, la qualité de ces données est un enjeu majeur de la recherche depuis 15 ans ([Girres & Touya 2010, Novack *et al.* 2022]), celle-ci étant variable.

Pour conclure, les deux organismes co-finançant ma thèse ont des attentes complémentaires avec l'IGN qui attend des suggestions d'améliorations de leurs données

3. https://www.centre-valdeloire.fr/vivre/simplifier-les-mobilites/transports-toutes-les-competences-de-la-region
4. https ://taginfo.openstreetmap.org/keys

cyclables et la région Centre Val-de-Loire qui attend un état des lieux des données relatives au cyclisme sur son territoire. Les contributions théoriques ont donc un intérêt pour l'IGN et leur application est attendue par la région. Quant à OSM, c'est une source de données importante car elle fournit des données routières permettant de représenter le réseau routier. Dans ce sens, nous pouvons la considérer comme une Base de données de réseaux de mobilités (BDRM) bien qu'elle dispose de données sur des thèmes écartés de la mobilité. Cependant, la qualité de cette BDRM doit être vérifiée.

## 1.3 Contexte scientifique et problématiques

Nous définissons une base de données de réseaux de mobilités (BDRM) comme une base de données géographique contenant des informations à propos des infrastructures liées à un réseau permettant de se déplacer. Les bases de données de réseaux de mobilités actuelles reposent majoritairement sur une structure en graphe avec les arcs représentant les tronçons de route et les sommets représentant les intersections du réseau. Elles fonctionnent avec un versionnement des tronçons qui peut être soit global, où une version publiée représente un jeu de données (BDTOPO®), soit par élément où chaque tronçon a son propre versionnement (OSM). De manière générale, une BDRM se focalise sur le traitement d'un usage. Dans le cadre de la France, la partie routière de la BDTOPO® se focalise principalement sur les véhicules à moteurs et les piétons. Ces derniers n'ont que très peu de chevauchement, ce qui les rend facilement implémentables en même temps dans une base de données. Cependant, de nouveaux usages utilisant une majorité des infrastructures routières existantes se développent à l'instar du cyclisme.

### 1.3.1 Modélisation des données routières pour le cyclisme

Cette évolution nous amène à nous questionner sur la capacité des BDRM actuelles à s'adapter à l'évolution des usages. D'après nos connaissances et comme indiqué dans notre état de l'art (cf. chapitre 2), les modèles actuels de BDRM ne semblent pas véritablement être adaptés aux nouvelles mobilités (vélo, engin de déplacement personnel motorisé (Engin de déplacement personnel motorisé (EDPM), etc.). La problématique de recherche $\mathcal{P}1$ résultant de ce constat est la suivante.

> $\mathcal{P}1$. Quelles seraient la structure et les caractéristiques d'une BDRM adaptée pour les cyclistes ?

Cette problématique soulève plusieurs questions de recherche. Selon notre état de l'art (chapitre 2), les nouveaux usages des mobilités ne sont pas bien inclus dans les BDRM actuelles. En effet, ces dernières ne peuvent pas toujours être enrichies en ajoutant des attributs ou peuvent nécessiter des changements majeurs dans leur structure. C'est pour cela que notre première question liée à $\mathcal{P}1$ est la suivante.

$\mathcal{Q}$1.1. Comment créer une BDRM adaptée au cyclisme ?

Ensuite, nous avons remarqué un problème concernant le partage des routes. De nos jours, de nombreuses routes ont plusieurs usagers tolérés parmi lesquels au moins un est prioritaire (piétons et personnes en fauteuil roulant, vélos et trottinettes électriques). Cependant, dans les BDRM, l'usage principal d'une voie de circulation est fréquemment le seul renseigné, laissant de côté les potentiels usages secondaires de cette voie. Ainsi, la deuxième question liée à $\mathcal{P}$1 est la suivante.

$\mathcal{Q}$1.2. Comment créer une BDRM qui intègre la gestion du partage de la voirie entre plusieurs usagers ?

Cette question est primordiale car les politiques actuelles d'aménagement du territoire tendent à beaucoup partager les espaces de mobilités.

Ensuite, nous avons remarqué que l'ensemble de ces BDRM est représenté à l'échelle du tronçon de route qui peut être composé de plusieurs voies avec des usages différents. Par exemple, deux voies sont affectées à la circulation automobile pendant qu'une bande cyclable sert à la circulation des vélos. Ainsi, la troisième question liée à $\mathcal{P}$1 est la suivante.

$\mathcal{Q}$1.3. A quelle granularité spatiale doit-on représenter l'intégralité des usages de la route ?

En plus du changement de granularité, les cyclistes ont besoin d'informations attributaires supplémentaires afin d'assurer leur sécurité et de pouvoir trouver l'itinéraire le plus efficace pour eux. Ce problème est résumé dans la quatrième question liée à $\mathcal{P}$1.

$\mathcal{Q}$1.4. Quelles informations sont spécifiquement nécessaires aux BDRM pour répondre aux besoins de l'usage cycliste ?

La création d'un tel modèle intéresse fortement l'IGN. Cela va dans le sens des évolutions récentes de la BD TOPO® qui a connu une évolution pour mieux modéliser le réseau cyclable. Pour autant, l'IGN rencontre des problèmes pour cette adaptation. Nous pensons que ceux-ci= sont liés à la modélisation par tronçons qui est trop contraignante pour inclure l'ensemble des usages de la route. La problématique du partage de la voirie est aussi un problème que les BDRM actuelles comme OSM ne peuvent pas résoudre. Enfin, la création d'un modèle comme celui-ci doit s'accompagner d'un peuplement avec des données qui ne sont pas forcément adaptées pour différentes raisons explicitées dans la section suivante.

### 1.3.2 Peuplement d'une BDRM

Dans cette sous-section, nous partons du principe que nous avons la BDRM adaptée aux cyclistes décrite dans $\mathcal{P}1$ et reposant sur le principe de représentation par voie de circulation.

Le problème d'un tel modèle est qu'il nécessite beaucoup plus d'informations que celles qui sont contenues dans les bases de données actuelles. L'information que doit contenir chaque voie de circulation étant agrégée à l'échelle du tronçon, il est difficile de savoir combien de voies existent réellement et quel est l'usage réel de ces voies. La problématique de recherche ($\mathcal{P}2$) traitée dans ce manuscrit, découlant de ce questionnement, est la suivante.

$\mathcal{P}2$. Comment peupler cette BDRM adaptée à l'usage cycliste à partir des données existantes ?

Pour peupler cette BDRM, il faut répondre à plusieurs défis. D'abord, comme évoqué précédemment, les BDRM existantes sont à l'échelle du tronçon. Cela implique que les données à l'échelle de chaque voie composant un tronçon sont incomplètes. Deux questions sont issues de ce problème.

$\mathcal{Q}2.1$. Comment peupler une BDRM à l'échelle de la voie de circulation avec des données à l'échelle du tronçon de route ?
$\mathcal{Q}2.2$. Quels sont les problèmes des sources de données existantes pour peupler un tel modèle ?

Étant donné les nouveaux moyens de transports évoqués ci-dessus, nous ne disposons d'aucune information dans ces modèles ou, dans le meilleur des cas, d'une information partielle sur leur usage relatif à ces mobilités. La généralisation des nouveaux usages est donc le point central de la quatrième question liées à $\mathcal{P}2$.

$\mathcal{Q}2.3$. Comment inférer certaines valeurs de données incomplètes ou inexistantes pour améliorer notre BDRM ?

Cette inférence peut aussi bien concerner le revêtement d'une route que son nombre de voies de circulations. C'est un champ très vaste où ce manuscrit n'apporte que des réponses partielles.

De plus, les données existantes proviennent de données multi-sources publiques, privées ou issues de la contribution citoyenne. Dans ce manuscrit, nous avons fait le choix d'utiliser la BDTOPO® et OSM pour des raisons d'accès aux données, de couverture spatiale et temporelle, de présence de spécifications, facilitant la reproduction de nos travaux de recherche. Après un peuplement individuel, de chaque base de données, il est nécessaire d'effectuer une phase d'appariement des deux jeux de données pour identifier l'information à conserver.

Une fois le modèle peuplé avec les données routières de mobilités, nous savons

grâce à notre état de l'art que de nombreux facteurs influent sur la cyclabilité d'une route comme le trafic routier, la pente, le vent etc. La troisième question liée à $\mathcal{P}2$ concerne l'ajout des données thématiques utiles à la mobilité cycliste.

> $\mathcal{Q}2.4$. Comment enrichir à l'aide de différentes sources une BDRM adaptée à l'usage cycliste ?

Ces différentes sources de données peuvent être liées au trafic routier ou au climat. Par exemple, concernant les données climatiques, il est difficile de trouver des données liées au vent à l'échelle d'une route. Cela existe dans des cas très précis comme une étape du Tour de France qui est sujette à un fort vent mais nous ne connaissons aucune généralisation de ces données à l'échelle d'une région. L'utilisation de données à une autre échelle (station météorologique) sera nécessaire tout comme le fait d'inférer ou interpoler ces données afin de les inclure dans la BDRM adaptée. Cette question ne sera pas traitée dans le manuscrit mais est une perspective ouverte par celui-ci.

Comme évoqué ci-dessus, la principale difficulté est de peupler un modèle par voie de circulation avec des données agrégées à l'échelle du tronçon de route. Les diverses questions soulevées dans cette partie montrent qu'il sera très difficile d'avoir une qualité parfaite à la fois dans l'adéquation au besoin qui est complexe pour ce problème et dans la qualité des données introduite dans la BDRM. Cependant, il nous faut quantifier ces problèmes de qualité. Pour cela, de nombreux travaux de recherche existent sur la qualité géométrique, sémantique et thématique ([Girres & Touya 2010]) mais nous souhaitons nous focaliser sur la fraîcheur qui reste peu abordée jusqu'à présent. De plus, nos deux principales BDRM ont une fraîcheur très différente avec la BDTOPO® qui dispose d'une version par trimestre pour le grand public quand OSM est mis à jour en continu si les contributeurs ont les connaissances et l'envie de saisir ou intégrer ces données dans OSM.

### 1.3.3 Analyse de la fraîcheur du réseau cyclable par le prisme de l'évolution

La qualité des données de la BDTOPO® est fiable et vérifiable. Certaines dimensions de la qualité sont représentées par les attributs de précision altimétrique ou la date de confirmation. De plus, la quantité de contributeurs de la BDTOPO® (les agents de l'IGN et ses partenaires) est très restreinte, ce qui permet de conserver une homogénéité dans son peuplement. Par contre, OSM dispose d'une beaucoup plus grande quantité de contributeurs et la qualité de leurs contributions est variable. Cela amène les données d'OSM à avoir des dimensions de la qualité de valeur variable : par exemple, les données d'OSM sur zone d'étude peuvent avoir une précision moyenne du fait de l'inexpertise des contributeurs impliqués mais une bonne fraîcheur théorique grâce à la possibilité de mise à jour en continu. Ce constat est la source de la problématique $\mathcal{P}3$ traitée dans ce manuscrit.

$\mathcal{P}3$. Comment mesurer et analyser la fraîcheur d'une BDRM cyclable ?

Notre l'état de l'art (chapitre 3) révèle que l'analyse de la fraîcheur de l'information géographique volontaire est complexe en raison des mises à jour en continu de ces bases de données. Nous cherchons donc un moyen d'analyser la fraîcheur. Nous visons ainsi à proposer une méthode permettant d'analyser la fraîcheur des données en s'appuyant sur la notion d'évolution de données. Cela engendre la première question de recherche issue de $\mathcal{P}3$.

$\mathcal{Q}3.1$. Comment étudier l'évolution du réseau cyclable ?

L'évolution du réseau cyclable se traduit d'abord de manière quantitative par la quantité d'infrastructures cyclables qui change au cours du temps. Cependant, il faut aussi une approche pour conserver uniquement les routes que les cyclistes utilisent sur le terrain.

Cette approche de l'analyse de l'évolution montre comment de multiples routes à usage mixte se retrouvent avec des erreurs d'édition à cause de ce partage entre plusieurs usagers. Ce problème est décrit dans la question suivante.

$\mathcal{Q}3.2$. Comment cette analyse de l'évolution du réseau cyclable peut mettre en évidence les conflits d'usage ?

En plus de ces questions méthodologiques, nous souhaitons fournir une analyse de l'évolution du réseau cyclable de la région Centre-Val de Loire, co-financeur de cette thèse. Cette analyse permettrait d'avoir une meilleure appropriation, par la population de la région et ses représentants, de son réseau.

$\mathcal{Q}3.3$. Comment le réseau cyclable de la région Centre Val-de-Loire évolue-t-il au cours du temps ?

Cette analyse du réseau cyclable de la région cherche à vérifier les différences entre les environnements de cette zone d'étude assez vaste (grandes villes, villes moyennes ou zones rurales). L'objectif est de mettre en évidence les conflits potentiels d'usages liés à la cohabitation entre usagers par exemples entre cyclistes et piétons, ou entre voitures et cyclistes. En particulier, il s'agit de comprendre l'impact de l'essor du cyclisme sur la sécurité et la disponibilité des itinéraires cyclables, en montrant par exemple comment l'interdiction des cyclistes sur certaines voies peut avoir un impact négatif en réduisant les alternatives de déplacement à vélo, et des impacts positifs en améliorant la sécurité générale.

A notre avis, toutes ces questions formulées jusqu'ici doivent s'efforcer à conserver un caractère de généralité afin de transposer ces travaux dans le cadre de tout autre usager du réseau routier. Ce principe est explicité dans la problématique de recherche ($\mathcal{P}4$) suivante.

$\mathcal{P}4$. Comment assurer la généralisation d'une recherche méthodologique focalisée sur un seul type d'usager à tout type d'usager du réseau routier ?

Cette question transverse amène la perspective de reproduction de nos travaux à tout usager de la route, incluant tout nouveau potentiel usage. De plus, seule la combinaison de ces travaux de recherche appliqués au cyclisme avec les autres mobilités (voiture, piéton, personnes à mobilité réduite etc.) permettra de réellement comprendre le fonctionnement actuel et à venir des mobilités.

## 1.4 Contributions

Ce manuscrit présente nos quatre contributions majeures qui sont détaillées ci-dessous. Ces contributions sont méthodologiques mais aussi thématiques.

Notre première contribution est de définir d'une manière formelle ce que représente un réseau cyclable. Cela inclut les infrastructures routières, les infrastructures non routières utiles aux cyclistes. Nous définissons ensuite les différents profils de cyclistes empruntant ce réseau. Concernant les infrastructures du réseau cyclables, nous réalisons une classification tenant en compte de l'usager prioritaire de chaque voie mais aussi des usagers autorisés à emprunter une voie. Pour les utilisateurs du réseau cyclable, nous pensons que les cyclistes ont des profils variés avec des besoins différents. La définition faite dans cette partie servira pour la classification utilisée lors de la contribution à venir sur l'évolution du réseau cyclable. Cette contribution permet de trouver des éléments de réponses à la question de recherche $\mathcal{Q}1.4$.

La deuxième contribution est la création d'un modèle conceptuel servant de BDRM adaptée à l'usage du cyclisme. Elle est adaptée pour les cyclistes d'un point de vue attributaire et permet de renseigner l'usage de tout usager. Cette contribution répond aux questions de recherche $\mathcal{Q}1.1$, $\mathcal{Q}1.2$ et $\mathcal{Q}1.4$. Ce modèle exploite la notion de voie de circulation au lieu des tronçons de route présents dans les principales BDRM. La notion de voie de circulation couplée à celle d'usager permet de représenter l'ensemble des usages de manière plus précise que ne le permet la notion de tronçon de route. La notion de partage de la voirie sera aussi beaucoup plus claire avec la priorité de chaque usager sur chaque sens de circulation de chaque tronçon qui sera explicitement mentionnée.

Cependant, les bases de données dont nous disposons sont toutes à l'échelle du tronçon de route et l'information nécessaire au passage du tronçon à la voie peut manquer. Dans ce sens, le peuplement de la BDRM proposée représente notre troisième contribution. Le fait de peupler notre modèle à partir de BDRM incomplètes pour notre usage vient répondre aux questions de recherche $\mathcal{Q}2.1$ et $\mathcal{Q}2.3$. Le modèle inclut aussi des informations sur les parkings pour vélos et d'autres points d'intérêts intéressant les cyclistes. De plus, une partie gérant l'historique des données est présente dans notre modèle conceptuel. Cette partie sur les données non routières utiles aux cyclistes permet de répondre à la question de recherche $\mathcal{Q}2.4$.

La quatrième contribution du manuscrit concerne deux méthodes d'évolution du

réseau cyclable dans OSM reposant sur le graphe multiplexe qui permet de formaliser de manière simplifiée les évolutions du réseau cyclable au cours du temps. Le graphe contient plusieurs couches, correspondant à chacune à une version différente d'une BDRM, en proposant de multiples attributs liés à l'évolution des tronçons. Cette partie répond donc à la question de recherche $\mathcal{Q}3.1$. La première approche est dite exhaustive et concerne une analyse de la totalité de tronçons de route composant le réseau cyclable. Cette approche présente des résultats par jeux de données individuellement et par évolution entre deux jeux de données à deux pas de temps consécutifs n et n+1. La seconde approche est dite non exhaustive et repose sur la génération d'itinéraires adaptés à l'usage cycliste. Elle consiste à générer aléatoirement des points d'origine et de destination, à calculer un ensemble d'itinéraires pour chaque version de la base de données pour ces mêmes points origine/destination, puis à analyser l'évolution des itinéraires au cours du temps. Nous calculons plusieurs indicateurs sur la longueur des itinéraires, un indicateur de centralité des voies et des indicateurs d'utilisation d'infrastructures cyclables par les itinéraires générés. Cette approche est réalisée dans plusieurs zones d'intérêts qui sont plus restreintes que la zone d'étude de l'approche par tronçons de routes. Dans le cadre de ces deux approches, chaque tronçon de route est labellisé par une classe représentant son degré d'adéquation à la pratique cycliste. L'usager principal de chaque voie est aussi mis en valeur. Cela apporte une compréhension des conflits d'usage dans la méthode par tronçons de route. Du côté de la méthode par itinéraires, l'évolution des infrastructures empruntées par les itinéraires peut permettre de mettre en évidence ces conflits. Ce volet des méthodes d'évolution du réseau cyclable permet de répondre à la question de recherche $\mathcal{Q}3.2$. Nous proposons ensuite un cas d'étude sur le cyclisme dans la région Centre Val-de-Loire. Ce cas d'étude répond à la question de recherche $\mathcal{Q}3.3$. Ces méthodes sont appliquées à OSM car, entre la BDTOPO® et celle-ci, elle dispose d'une qualité plus hétérogène et subis beaucoup plus de changements que la BDRM de l'IGN.

## 1.5 Plan de la thèse

Ce manuscrit est organisé en trois grandes parties. La première partie est un état de l'art général pour bien positionner nos travaux. Dans cette partie, le chapitre 2 présente le réseau cyclable dans la littérature, que ce soit sa forme physique, sa modélisation mais aussi son usage. Ce chapitre permettra de répondre aux diverses questions de la problématique de recherche $\mathcal{P}1$. Le chapitre 3 définit la qualité des données avec ses multiples dimensions. Il servira de socle pour répondre à la question de recherche $\mathcal{Q}2.2$. Le chapitre 4 présente la modélisation des usages du réseau cyclable dans la littérature. Ce chapitre met en avant de multiples outils et méthodes qui seront employés plus tard dans ce manuscrit.

Ensuite, la deuxième partie présente notre apport pour définir le réseau cyclable, modéliser et instancier sa représentation dans une BDRM. Dans cette partie, le chapitre 5 présente notre définition du réseau cyclable. Nous apportons ici la pierre

angulaire des quatre chapitres suivants car ils reposent tous sur cette définition du réseau cyclable. Nous définissons aussi l'ensemble des usages possibles du cyclisme. Le chapitre 6 explique la structure de notre BDRM adaptée aux cyclistes. La question de recherche $\mathcal{Q}1.1$ est principalement traitée dans ce chapitre. Le chapitre 7 présente l'instanciation de notre BDRM adaptée aux cyclistes avec une application sur le réseau cyclable de la région Centre Val-de-Loire. Les questions de recherche $\mathcal{Q}2.1$, $\mathcal{Q}2.2$ et $\mathcal{Q}2.4$ sont traitées en détails dans ce chapitre.

Enfin, la troisième partie présente notre apport pour analyser l'évolution du réseau cyclable dans OSM. Dans cette partie, le chapitre 8 introduit notre graphe multiplexe permettant de représenter les évolutions du réseau cyclable ainsi que nos méthodes d'analyse de l'évolution d'OSM centrées sur l'usage du cyclisme. Ce chapitre répond à la question de recherche $\mathcal{Q}3.1$. Le chapitre 9 fournit de plus amples détails sur le paramétrage de ces deux méthodes et les résultats obtenus répondant aux questions de recherche $\mathcal{Q}3.2$ et $\mathcal{Q}3.3$.

Enfin le chapitre 10 conclut ce manuscrit avec plusieurs perspectives d'avenir.

# Première partie

# État de l'art

Dans cette partie, nous réalisons un état de l'art pluridisciplinaire sur l'ensemble des notions nécessaires à la compréhension du manuscrit et au positionnement scientifique de ce manuscrit.

Le chapitre 2 présente le réseau cyclable, ses acteurs, sa représentation dans les bases de données routières et les déterminants de son utilisation. Nous justifions les choix expliqués dans l'introduction concernant la granularité optimale de représentation des infrastructures routières dans une BDRM.

Le chapitre 3 présente une définition complète de la qualité des données. Nous poursuivons en expliquant plus en détail la notion de fraîcheur des données. Nous finissons ce chapitre par un état de l'art de l'analyse de la qualité spécifiquement dans OpenStreetMap. Il met en avant une méthode d'analyse de l'évolution ayant un fort potentiel pour nous aider à répondre à nos questions de recherche.

Le chapitre 4 présente plusieurs outils mathématiques nécessaires à la modélisation et l'analyse de l'évolution du réseau cyclable dont les graphes, aussi bien statiques que dynamiques, les algorithmes de plus courts chemins et les différentes méthodes d'échantillonnage.

Chapitre 2

# Le réseau cyclable : existant, usage et modélisation

**Sommaire**


**2.1 Le réseau cyclable dans le monde réel . . . . . 17**
**2.2 L'utilisation du réseau cyclable . . . . . 18**
2.2.1 Profils de cyclistes . . . . . 19
2.2.2 Cyclabilité . . . . . 21
**2.3 Les BDRM et le réseau cyclable . . . . . 24**
**2.4 Modélisation du réseau cyclable . . . . . 29**
**2.5 Conclusion . . . . . 31**


Selon la littérature, le réseau cyclable peut être compris de différentes manières. C'est pour cela que la première contribution de ce chapitre consiste à définir le réseau cyclable selon l'état de l'art. Dans un deuxième temps, la littérature met en avant de nombreux usages du cyclisme avec plusieurs paramètres influant sur ces usages. Dans le but de clarifier cet aspect de la littérature nous listons l'ensemble des profils de cyclistes ainsi que les différents critères de cyclabilité proposés dans l'état de l'art. Ensuite, nous analysons les BDRM existantes afin de savoir si l'une d'entre elles est applicable au cyclisme et serait généralisable à l'ensemble des types d'usager des infrastructures routières. Nous poursuivons cette analyse avec des propositions existantes de modélisations du réseau cyclable qui pourraient être des pistes d'améliorations pour les BDRM existantes.

## 2.1 Le réseau cyclable dans le monde réel

Le réseau cyclable est un ensemble d'infrastructures à la fois dédiées spécifiquement à l'usage cycliste et à d'autres usages à condition que l'usage cycliste soit tolérés. Le réseau cyclable n'a que très peu de définitions, par contre, la représentation des infrastructures cyclable dans une base de données géographiques a été étudiée par de nombreux instituts nationaux (IGN en France, Ordnance Survey au Royaume Uni) ayant par la suite formulé des directives pour la représentation d'infrastructures cyclables. De manière usuelle, les infrastructures cyclables sont définies comme l'ensemble des voies cyclables, la signalisation, le stationnement, l'éclairage et les autres aménagements (non linéaires sauf les rampes d'escaliers). Les voies cyclables sont l'ensemble des pistes cyclables, bandes cyclables, voies partagées avec

les piétons ou les bus, vélo-routes et voies vertes. Cette définition des infrastructures cyclables est assez large et dans de nombreux cas, le cycliste n'est pas prioritaire sur l'aménagement, ce qui est une source potentielle de conflits entre différents usagers. D'autant que des conflits d'usage peuvent apparaître de par la présence de cyclistes plus nombreux sur certains aménagements partagés avec les piétons qui se révèlent désormais insuffisamment larges face à l'essor du cyclisme.

[Vierø *et al.* 2024] prennent comme définition du réseau cyclable l'ensemble de ces infrastructures cyclables. Cependant, cette définition n'est pas applicable dans le cas de recherche d'itinéraires car le réseau cyclable est morcelé. C'est avec la même définition du réseau cyclable que [Néron *et al.* 2023] proposent de détecter les manques d'infrastructures cyclables dans le monde réel grâce à des traces Global Positionning System (GPS). Dans un voeux d'élargissement de cette définition, le site web *wandrer.earth*[1] propose une définition du réseau cyclable comme l'ensemble des routes et chemins sur lesquels les cyclistes sont tolérés. Cette définition est ensuite appliquée dans la base de données OSM à l'échelle mondiale. A partir de cela, les créateurs de ce site web ont inventé un jeu de découverte du monde qui est la base de ce site. L'idée principale est que chaque mile parcouru rapporte un point mais il est impossible de gagner des points en empruntant des routes que l'on a déjà utilisé. Cette définition, faite à partir de l'usage réel des infrastructures routières, permet de mieux représenter le réseau cyclable physique dans la majorité des pays qui ne disposent pas d'un réseau de pistes cyclables aussi développé qu'au Danemark ou aux Pays-Bas.

[Arantxa 2000] montre comment les Pays-Bas se détachent en terme de qualité d'infrastructures cyclables car ce pays dispose d'une part modale pour le cyclisme proche de 30% et un néerlandais réalise en moyenne environ 1000km par an en vélo. À titre de comparaison, la France a une part modale pour le cyclisme de 3% et un français parcourt en moyenne un peu moins de 100km par an en vélo.

Ainsi, nous ne pouvons pas utiliser la définition du réseau cyclable donnée dans l'état de l'art. Nous allons donc donner notre définition du réseau cyclable dans le chapitre 5 qui est centrée sur l'usage. À partir de cette vision, nous nous intéressons dans la section suivante à la question des usages du réseau cyclable.

## 2.2 L'utilisation du réseau cyclable

La recherche de l'itinéraire optimal est un problème multicritère [Sauvanet 2011] où chaque critère peut prendre plus ou moins d'importance en fonction du profil de cycliste. Cette section présente d'abord les différents profils de cyclistes utilisant les infrastructures cyclables. Ensuite, nous listons les critères d'utilisation d'un tronçon de route par un cycliste.

1. https://wandrer.earth/

### 2.2.1 Profils de cyclistes

[Geller 2006] a proposé une classification des cyclistes dans 4 catégories représentant l'attitude d'un cycliste lors de sa pratique : *strong and fearless* (forts et sans craintes), *enthused and confident* (enthousiastes et confiants), *interested but concerned* (intéressés mais préoccupés) et *no way no home* (apeurés). La catégorie des *forts et sans peurs* représente les cyclistes confirmés qui n'ont pas peur de circuler à vélo dans un flux automobile important. La catégorie des *enthousiastes et confiants* représente un groupe de cyclistes un peu moins chevronnés que le précédent mais qui ont quand même une expérience solide du vélo. Les personnes *intéressées mais préoccupées* souhaitent utiliser plus leur vélo mais sont inhibées par la peur due principalement à la circulation partagée avec les véhicules à moteurs. La catégorie des *apeurés* représente les personnes encore plus craintives de la circulation avec les voitures. Cette dernière classe ne circule à vélo que dans le cas difficilement trouvable d'absence totale de voiture et avec très peu d'autres usagers de manière générale autour de soi. De plus, des travaux ont confirmé l'existence de ces classes en fournissant des proportions de cyclistes dans chaque catégorie [Dill & McNeil 2012]. Entre 55% et 60% des cyclistes font partie de la catégorie des *intéressés mais préoccupés*, environ 30% sont dans la catégorie des *apeurés* et le reste se trouve dans les deux premières classes avec des répartitions un peu moins bien définies. Cependant, la classification de [Geller 2006] et les preuves apportées sont centrées en Amérique du Nord et n'ont pas été testées sur d'autres continents. De plus, elles n'expliquent pas le motif de la sortie à vélo. Est-ce pour un réel besoin comme aller au travail, faire une course, ou est-ce par loisir ? En effet, nous supposons qu'un cycliste se rendant au travail n'aura pas les mêmes attentes en terme d'utilisation du réseau cyclable qu'un cycliste en vacances voulant visiter une certaine zone. Pour répondre à cette question, [Kesenheimer *et al.* 2023] ont réalisé une étude sur les ressorts psychologiques de multiples personnes pratiquant du vélo et a classé les répondants en trois catégories : les *cyclistes de compétitions*, les *cyclistes de loisirs* et les *cyclistes de vélotaf* (combinaison de *vélo* et de l'argo *taf*, terme employé pour un trajet domicile/travail à vélo). Les deux dernières catégories se rapprochent de celles établies par [Sauvanet 2011]. Le tourisme à vélo est en développement en ce moment car il est considéré comme un moyen de faire du tourisme durable [Derman & Keles 2023]. Cette catégorie rentre parfaitement dans la classe de cycliste de loisirs.

Un usage récent du vélo concerne la livraison à vélo. [Allen *et al.* 2021] ont mené une étude dans le "Greatest London" sur le nombre de livraisons de repas par jour et la distance de chacune d'entre elles. Les résultats montrent que les courses sont nombreuses mais très courtes (à peine 2.2km en moyenne). Cette catégorie de cyclistes est nouvelle mais tend à se rapprocher du vélotaf notamment par sa concentration dans un environnement urbain qui est semblable dans les deux cas. L'étude de [Ek 2021] montre que la pratique du vélotaf est de plus en plus développée dans les lieux où les infrastructures le sont. Cependant, les classes de *livraison* et de *tourisme* doivent être divisées en 8 pour [Korver 2018]. Il propose les classes suivantes : *services*, *maison*, *travail rémunéré*, *shopping non quotidien*, *shopping quotidien*, *social*, *loisir*

et *récréation*. Ces catégories sont regroupées en *utilitaires* et *non-utilitaires*. Cette classification se confirme par les propos de [Fernández-Heredia & Monzón 2010] qui font la distinction entre les déplacements obligatoires et les déplacements libres.

Concernant la compétition, [Kesenheimer *et al.* 2023] montrent que les cyclistes de cette catégorie ont plus tendance à accepter ou à rechercher la douleur tandis que les autres cyclistes vont la limiter, voir à complètement l'éviter. Ils sont souvent dans les catégories de *forts et sans craintes* ou *enthousiastes et confiants* de [Geller 2006] car ils réalisent de par leur entraînement de longues distances à vélo afin d'être compétitifs.

Les profils de cyclistes se diversifient de plus en plus avec l'apparition de nouveaux types de vélos disposant d'une assistance électrique. Ce nouveau mode de transport a conduit de nombreux automobilistes à délaisser leur voiture pour le vélo à assistance électrique [McQueen *et al.* 2020]. Un autre vélo révolutionne actuellement le monde de la livraison : le vélo-cargo et sa déclinaison avec une assistance électrique. [Temporelli *et al.* 2022] montrent que l'acheminement de produits dans le dernier mile de la livraison est beaucoup plus pratique avec un vélo cargo qu'en van. De plus, [Bissel & Becker 2024] montrent que le vélo cargo réduit la dépendance des usagers à la voiture dès qu'ils commencent à l'adopter.

Pour conclure, beaucoup de profils de cyclistes existent avec des objectifs différents. Ce qu'il faut retenir est que, pour relier un point A et un point B, plusieurs cyclistes ne vont pas forcément emprunter le même itinéraire selon leur rapport au vélo, le but de leur utilisation du vélo et le type de vélo qu'ils utilisent. Nous plaçons la notion d'expérience expliquée par [Geller 2006] au second plan car, dans le cadre d'une sortie en groupe, la classe retenue dépendra principalement de l'usager le moins en confiance sur un vélo.

Les profils de déplacements cyclistes retenus sont :

— les déplacements utiles à la vie de tous les jours. Ils contiennent des déplacements entre le domicile et le travail ou l'école, les déplacements pour faire des courses ou dans le but de réaliser une autre activité que le vélo (cinéma, restaurant etc.).
— les livraisons à vélo. Cette méthode de livraison est utilisée principalement par la livraison de repas mais aussi pour des charges de plus en plus lourdes avec l'apparition des vélo cargos électriques.
— les déplacements à but récréatif et touristique. Ils constituent la base du slow-tourisme et du cyclo-tourisme.
— le cyclisme en compétition. Ces cyclistes sont ceux qui ont la plus grande expérience en raison du kilométrage nécessaire pour s'entretenir et progresser.

Après avoir présenté les différents types de cyclistes, nous allons expliquer les différents critères qui influencent sur les cyclistes dans leurs choix de planification d'itinéraires cyclables.

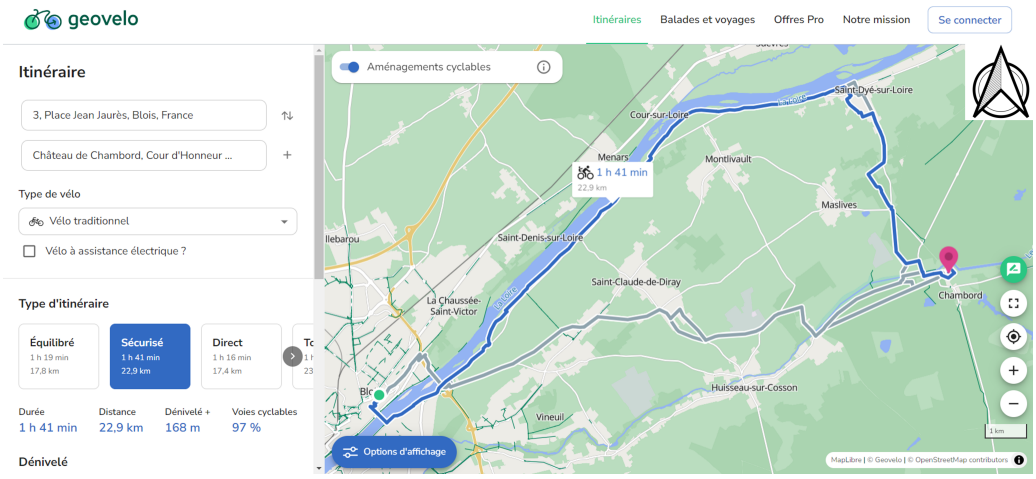



FIGURE 2.1 – Capture d'écran du mode de traçage d'itinéraire sécurisé de Géovélo. Exemple entre Blois et le château de Chambord

### 2.2.2 Cyclabilité

La cyclabilité représente à quel point un élément composant le réseau cyclable (une route, une intersection) ou une zone géographique (un quartier, une ville) est favorable du point de vue d'un cycliste. Une bonne valeur de cyclabilité dans une zone va souvent amener beaucoup plus de personnes à privilégier ce type de mobilité.

Selon [Ahmed *et al.* 2024], il existe cinq grands critères permettant d'évaluer la cyclabilité qui sont la sécurité, le confort, le caractère direct, la cohérence et l'attractivité.

La sécurité fait référence au fait de ne pas être mis en danger pendant un itinéraire à vélo. La sécurité peut à la fois être améliorée via des infrastructures [Pucher & Buehler 2016] mais aussi par des apports technologiques [Kapousizis *et al.* 2023]. L'outil de traçage d'itinéraires de Géovélo [2] propose un mode priorisant la sécurité comme illustré dans la figure 2.1. GéoVélo est un outil de génération d'itinéraires cyclables employant les données d'OSM après un raffinement de celles-ci. L'itinéraire proposé entre Blois et Chambord est 5km plus long (soit environ 30%), que les autres itinéraires possibles selon l'application mais la proportion de pistes cyclables est très élevée. Cela implique de prioriser de manière forte l'emploi de pistes cyclables protégées au prix d'importants détours. Par ailleurs, des travaux de recherche existent pour générer des itinéraires pour les voitures évitant des croisements compliqués [Krisp & Keler 2015], bien que ces travaux nécessitent une adaptation au cadre cycliste.

Le confort représente le fait de dépenser le moins d'énergie et de concentration mentale durant son trajet à vélo. Cela peut se traduire par le choix d'une surface lisse [Hölzel *et al.* 2012]. De plus, ces surfaces peuvent aussi avoir un revêtement d'une qualité dégradée, ce qui a amené [Gao *et al.* 2018] à rechercher une corrélation entre

2. https://geovelo.app/fr/

le confort perçu et la quantité de vibrations sur plusieurs tronçons de route.

Concernant à la fois le confort et la sécurité, il est beaucoup plus difficile et dangereux de se déplacer à vélo sur un itinéraire vallonné que sur du plat. Dans ce sens, [Matias *et al.* 2020] présentent les défis pour cette mobilité dans un contexte urbain. Cela implique que le ratio entre la vitesse du cycliste et celle d'une voiture est plus grand, renforçant la notion d'insécurité pour le cycliste et l'inconfort de monter une pente qui, chez certaines personnes, est un facteur qui empêche l'usage du vélo.

Le caractère direct pour un cycliste représente le fait d'utiliser des infrastructures permettant d'accéder à son point d'arrivée rapidement. Cela inclue les détours physiques [Hull & O'Holleran 2014] tout comme les arrêts à des intersections. Un détour physique consiste à devoir contourner un obstacle ou une contrainte qu'elle soit physique ou liée au code de la route.

La cohérence représente l'accessibilité du réseau d'infrastructures cyclables et la quantité de lieux qu'il dessert. [Wałdykowski *et al.* 2022] montrent qu'un réseau d'infrastructures cyclables cohérent, bien qu'il ait un certain prix, aura un retour sur investissement beaucoup plus important que si l'on crée un réseau n'ayant aucun sens. La notion de continuité du réseau cyclable est aussi à prendre en compte dans ce critère.

L'attractivité représente les alentours d'une infrastructure cyclable. Sommes-nous dans la nature ou au milieu d'une route à 6 voies depuis laquelle on ne voit que des usines ? [Rutten 2021] démontrent que des critères environnementaux comme le fait d'utiliser son vélo dans un grand espace vert viennent influer le choix de certains itinéraires cyclistes et amènent des usagers à choisir ou non le cyclisme comme moyen de transport.

Plusieurs indicateurs de cyclabilité utilisant l'ensemble de ces critères ou une partie sont présentés dans [Ahmed *et al.* 2024, Kellstedt *et al.* 2021]. Ils sont réalisés aussi à différentes échelles (tronçon de route, grille de X*X mètres, ville etc.). Deux familles d'approches ressortent pour analyser la cyclabilité : les scores par questionnaires et les scores par une analyse multi-critères. Un exemple d'indicateur de cyclabilité est celui de [Arellana *et al.* 2020] qui combine de nombreux critères dont l'attractivité via la présence d'infrastructures cyclables et l'esthétique du paysage mais aussi la sécurité du trafic routier avec le nombre de véhicules à moteurs (voitures ou bus par exemple) sur un tronçon donné et la sécurité de manière générale représentée par la présence d'éclairage public ou de caméras de sécurité. [Passmore *et al.* 2024] ont proposé une évaluation de la qualité du réseau cyclable en utilisant des plus courts chemins optimisés pour le cyclisme.

Un autre indicateur de cyclabilité est le baromètre des villes cyclables de France [3]. Il consiste en une note (un score allant de 1 à 6 représenté par des lettres de G à A+) attribuée à chaque ville tous les deux ans. Cet indicateur est constitué de cinq sous-indicateurs notés de la même manière : *ressenti global*, *sécurité*, *confort*, *efforts de la ville* et *service et stationnement*. La figure 2.2 présente les résultats du baromètre

3. https://barometre.parlons-velo.fr/2021/

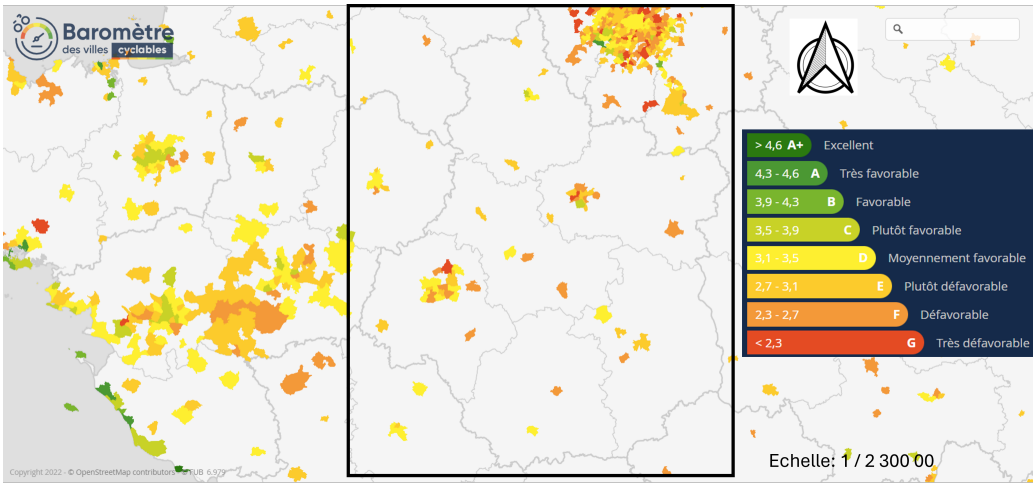



FIGURE 2.2 – Capture d'écran du baromètre des villes cyclables de 2021 pour la région Centre Val-de-Loire

en 2021 pour la région Centre Val-de-Loire et ses alentours.

Nous pouvons observer dans cette figure qu'il y a un manque de données important sur la région. L'ensemble de la région ne compte qu'un peu plus de 50 communes avec un score avec des communes qui sont généralement les grandes et moyennes villes. La région dispose de très peu de données, surtout quand on la compare à la région Pays de la Loire à l'Ouest. Ces disparités territoriales se traduisent aussi à l'échelle nationale avec seulement 1 625 communes ayant une valeur sur les 34 955. Ce manque de représentativité se confirme avec par exemple le département de la Haute-Saône qui n'a aucune commune représentée dans cet indicateur. De plus, beaucoup de départements n'ont qu'un nombre réduit de villes participant comme l'Indre où seuls Argenton-sur-Creuse (sous préfecture) et Châteauroux (préfecture) ont un résultat.

Afin de normaliser le domaine de l'analyse de la qualité du réseau cyclable, [Grisiute *et al.* 2024] propose une ontologie (cf. figure 2.3) regroupant 28 critères d'évaluation qui peuvent être appliqués sur 7 types d'objets ou zones différents.

Cette ontologie montre bien les multiples critères et types d'objets pouvant servir de support à l'évaluation de la qualité du réseau cyclable. De plus, une revue de la littérature réalisée dans ces travaux a permis d'identifier 176 métriques différentes liées à ces 28 critères d'évaluation. Bien que ces 28 critères de [Grisiute *et al.* 2024] contiennent ceux exposés par [Ahmed *et al.* 2024], l'ensemble des 28 critères peut être associé à l'un des 5 critères de [Ahmed *et al.* 2024] comme le critère AirQuality (qualité de l'air) qui est associé au confort. Cependant, le domaine de la cyclabilité est toujours analysé comme illustré par la publication récente de nouveaux travaux dans le domaine [Ardizzoni *et al.* 2024]. Ces travaux recherchent les critères principaux qui influencent le choix d'un itinéraire cyclable, en exploitant un algorithme de recherche d'importance. Il en ressort que les deux principaux critères sont la sécurité et la distance de l'itinéraire.

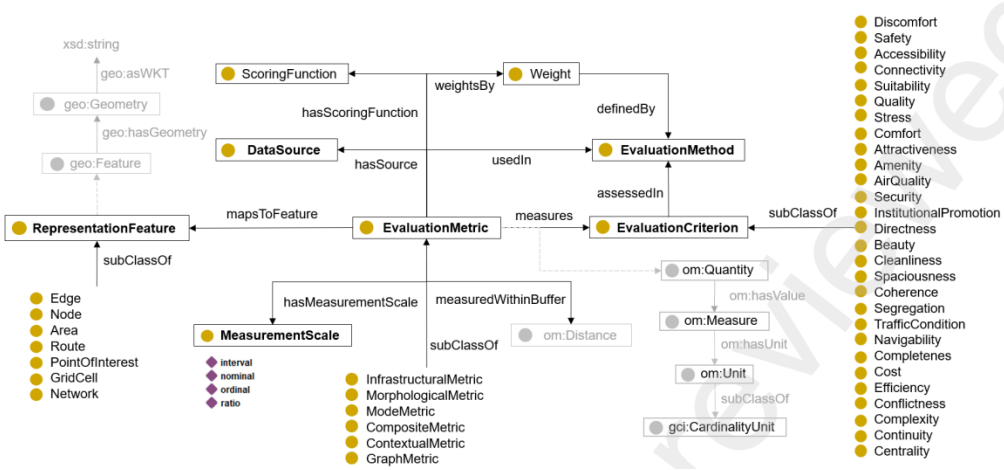



FIGURE 2.3 – Ontologie de l'analyse de qualité du réseau cyclable issu de [Grisiute *et al.* 2024]

Pour conclure, la cyclabilité est un indicateur composé de plusieurs critères et peut être calculée sur plusieurs zones géographiques différentes. Ces critères représentent les besoins des cyclistes pour se déplacer. De plus, plusieurs types d'éléments du réseau d'infrastructures (e.g., un tronçon de route, une intersection) ou composition d'éléments (e.g., un quartier) peuvent recevoir un score de cyclabilité. Des bases de données de routes et de trafic sont principalement utilisées. La prochaine sous-section présente les bases de données géographiques avec la présence ou non d'attributs liés à ces critères.

## 2.3 Les BDRM et le réseau cyclable

Cette section concerne la présentation des principales bases de données de réseau de mobilités (BDRM) contenant des informations sur le réseau cyclable.

Les principales bases de données routières en France peuvent être produites par un organisme (la BDTOPO® de l'IGN, la base ViaMichelin, Multinet de téléAtlas), issues de l'information géographique volontaire (VGI, [Goodchild 2007]) représentée par OpenStreetMap (OSM) ou Wikimapia, ou encore de cartographies interactives comme Google Maps ou Bing Maps. Les données issues des navigateurs web et de la VGI sont assez souvent à l'échelle mondiale contrairement aux données des agences nationales de cartographie comme l'IGN en France ou l'Ordnance Survey en Grande Bretagne. Nous retrouvons aussi des portails de données en open data mais à l'échelle d'une métropole.

**BDTOPO®** Selon son descriptif de contenu [IGN 2021], la BDTOPO® est la modélisation 3D du territoire et de ses infrastructures. Elle contient une description vectorielle, structurée en objets, des éléments du territoire et de ses infrastructures, de précision métrique. Les objets représentés dans cette base sont variés comme

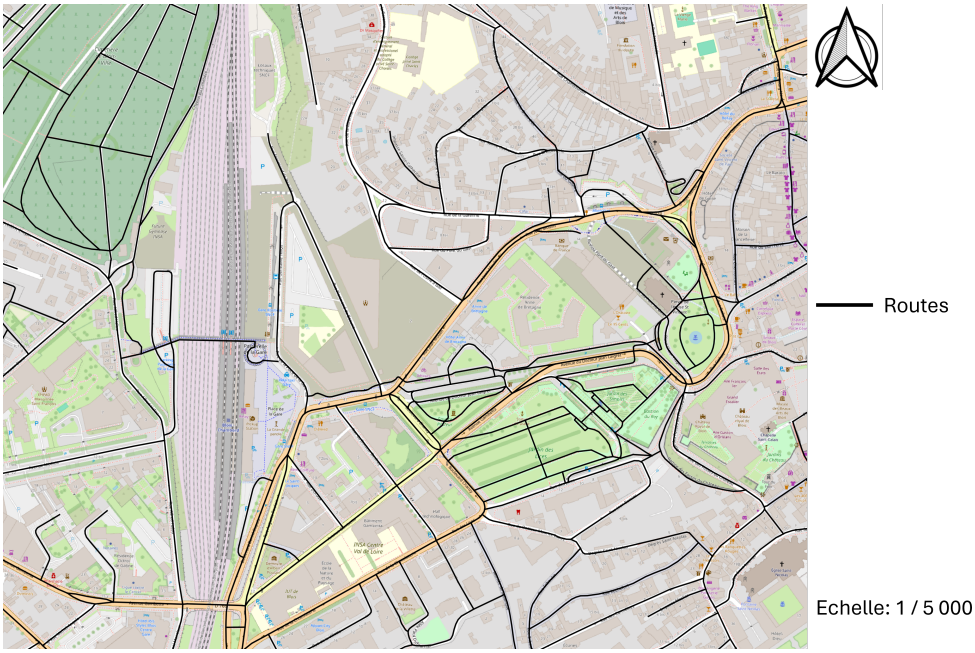



FIGURE 2.4 – Réseau routier de la BDTOPO® autour de la gare de Blois (version mars 2024) sur un fond de carte OSM

le réseau routier, les établissements recevant du public (Établissement recevant du public (ERP)), les étendues d'eau, les limites administratives etc. La figure 2.4 présente le réseau routier de la BDTOPO® autour de la gare de Blois. Elle illustre une bonne couverture des routes principales même si de nombreux petits tronçons, généralement dans les parcs, ne sont pas présents. Cela peut s'expliquer par des spécifications assez restrictives venant de la BDTOPO® qui s'appliquent sur la longueur minimale de certaines infrastructures. Par exemple, toute piste cyclable de moins de 50 mètres de longueur n'est pas prise en compte dans la BDTOPO®. Les données de cette base ont été recueillies par des agents de l'IGN et par télédétection. De nos jours, cette base de données est mise à jour lors de campagnes de collecte de données et avec les remontées de certains partenaires (EDF pour les lignes électriques par exemple). La partie concernant les réseaux d'infrastructures routières de mobilités de cette base de données a principalement été construite autour de l'usage de la voiture et de la marche mais l'usage du vélo tend à se renforcer. En effet, la BDTOPO® s'inspire de modèles d'infrastructures cyclables comme celui de l'association Vélo & Territoires [4] pour proposer une meilleure représentation des infrastructures cyclables. Ce modèle a été publié en novembre 2021. Par exemple, la version 2 de la BDTOPO® ne contenait qu'un champ donnant le sens d'une éventuelle bande cyclable. Dans la version 3, un champ donnant le type d'aménagement cyclable à droite de la chaussée et un autre champ faisant de même à gauche de la

4. https://www.velo-territoires.org/politiques-cyclables/data-velo-modeles-donnees

chaussée ont remplacé cet attribut. Cette base de données est reconnue comme de bonne qualité même si sa fraîcheur est dépendante des campagnes de l'IGN et des remontées des partenaires. Nous pouvons constater de rares erreurs comme un problème de liaison entre la passerelle de la gare de Blois et le reste du réseau routier. Ces données servent souvent comme vérité terrain lors d'analyse de qualité de VGI [Girres & Touya 2010, Le Guilcher *et al.* 2022].

**OSM** Comme présenté dans l'introduction, OSM est un projet participatif (VGI) regroupant des données à l'échelle mondiale sur beaucoup de thématiques (routes, bâtiments, points d'intérêts etc.). Cependant, la qualité de cette base de données est aléatoire.

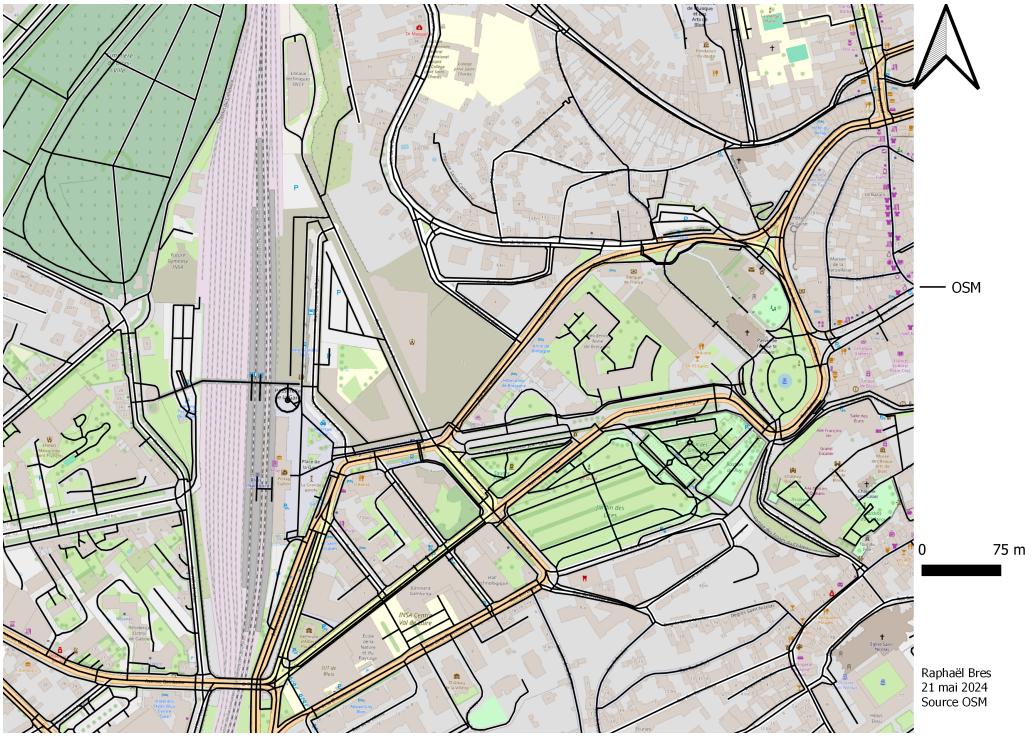



FIGURE 2.5 – Réseau routier d'OSM autour de la gare de Blois ($1^{er}$ janvier 2024)

La figure 2.5 présente le réseau routier d'OSM autour de la gare de Blois. Notons que cette carte montre beaucoup plus de tronçons car l'ensemble des trottoirs sont représentés. De manière générale, le réseau d'OSM est plus dense que celui de la BDTOPO®. Ces données sont éditables par tout contributeur du projet à tout moment, ce qui permet d'avoir en théorie des données de très haute qualité et surtout avec une très bonne fraîcheur. De plus, les spécifications ne sont pas aussi restrictives que pour les données d'autorités donc l'intégralité des tronçons du monde réel pourraient en théorie être présents dans OSM. Cependant, les zones géographiques ne disposent pas du même nombre de contributeurs actifs, ce qui crée des différences entre des zones densément peuplées, qui ont souvent plus de contributeurs actifs,

et des zones moins densément peuplées. De plus, la qualité des contributions est inégale au regard de l'expérience de chaque contributeur et de sa connaissance de la zone où il apporte une modification. Ces contributions inégales couplées au fait qu'il n'y a aucun contrôle automatique dans OSM (seulement des vérifications par les pairs à la demande) amènent une qualité des données hétérogènes. Il y a aussi un risque de dégradation volontaire ou non de la donnée appelé carto-vandalisme [Truong *et al.* 2020]. Tout cela amène à de très nombreux travaux sur la qualité des données d'OSM qui seront présentés plus en détails dans la section 3.2.

**Données ouvertes** Les portails de données ouvertes se multiplient et les infrastructures cyclables sont une partie intégrante de ces projets. Nous retrouvons ici des données sur des zones beaucoup plus petites, ce qui permet un meilleur recensement des infrastructures cyclables. C'est dans cette idée que [Wysling & Purves 2022] ont proposé un indicateur de cyclabilité sur les infrastructures cyclables de la ville de Paris [5]. Ces travaux font d'abord mention de la grande exhaustivité de ce jeu de données qui est difficilement transposable à un pays entier. Cependant, le jeu de données utilisé dans ces travaux est maintenant indiqué comme obsolète par la ville de Paris. Des données semblables existent pour la ville de Genève [6] mais la quantité d'information est limitée à un type d'infrastructure.

D'autres données ouvertes existent mais sont très souvent des extractions d'OSM comme pour la métropole de Tours [7] ou celle de Montpellier [8]. Il est important de noter que, dans le cadre de la métropole de Tours, les données ont été raffinées par GéoVélo. Cela s'explique par le fait que de nombreuses collectivités territoriales partagent leurs données ouvertes sur OSM.

**Google Maps** Google Maps est une application où les données sont visualisables gratuitement mais l'accès aux données complètes n'est possible que via un abonnement à une Application Programming Interface (API). Les données sont mises à jour par télédétection et lors de campagnes dédiées principalement à la Google Street View. La figure 2.6 présente le réseau routier de Google Maps autour de la gare de Blois. Elle montre que le contenu est d'assez bonne qualité en France même si la fraîcheur de cette base de données peut être dépendante des passages du camion de la Google Street View et des éléments obstruant la vue de cette dernière comme des arbres cachant une piste cyclable parallèle à une route. Cependant, il n'existe aucune étude de qualité sur les données de Google Maps. Cela n'empêche pas certains chercheurs d'utiliser ces données comme vérité de terrain pour une analyse de

5. https://opendata.paris.fr/explore/dataset/reseau-cyclable/information/?disjunctive.typologie_simple&disjunctive.bidirectionnel&disjunctive.statut&disjunctive.sens_velo&disjunctive.voie&disjunctive.arrdt&disjunctive.bois&disjunctive.position&disjunctive.circulation&disjunctive.piste&disjunctive.couloir_bus&disjunctive.type_continuite&disjunctive.reseau

6. https://ge.ch/sitg/sitg_catalog/sitg_donnees?keyword=amenagements%20cyclables&distribution=tous&datatype=line&topic=tous&service=tous&sort=alpha

7. https://transport.data.gouv.fr/datasets/pistes-cyclables-tours-metropole-val-de-loire

8. Plateforme OpenData de la Métropole de Montpellier

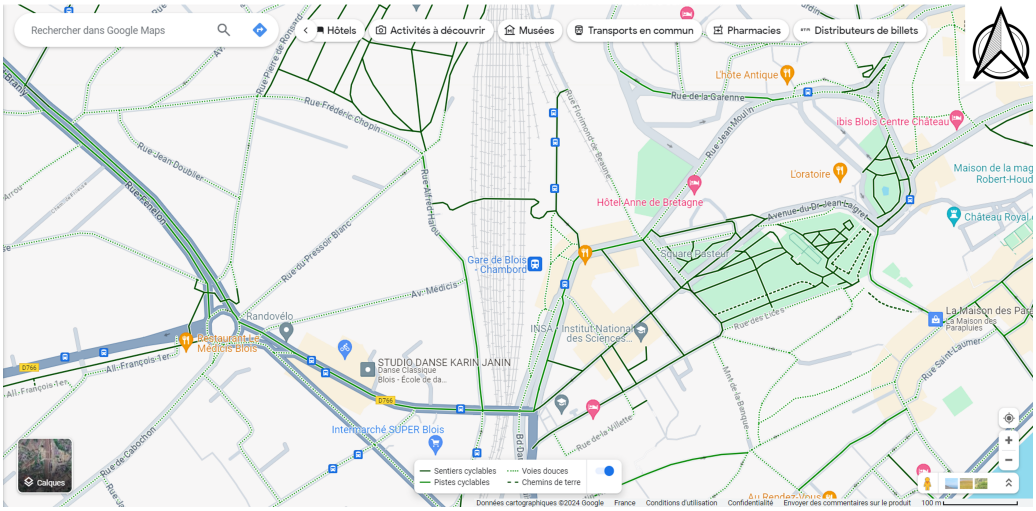



FIGURE 2.6 – Capture d'écran de Google Maps autour de la gare de Blois

qualité de VGI [Ciepłuch *et al.* 2010].

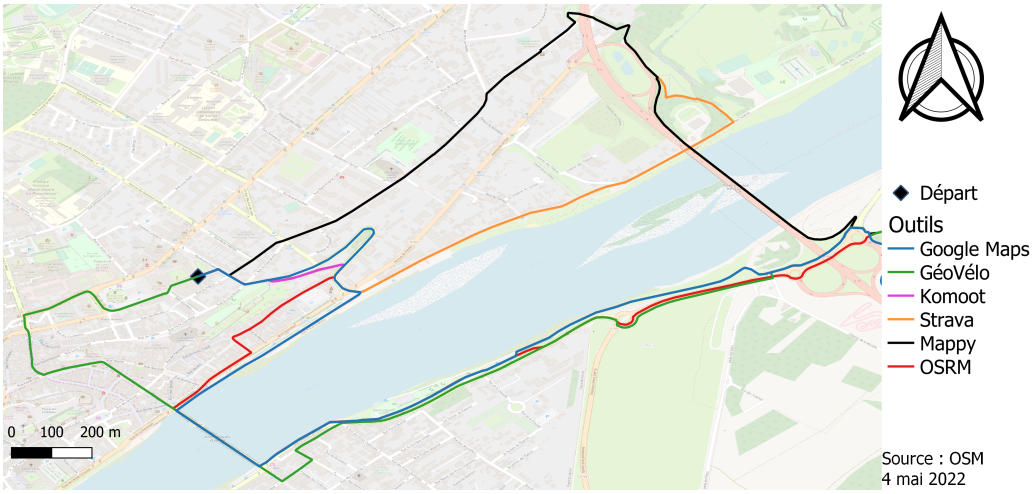



FIGURE 2.7 – Les itinéraires directs des différents outils pour sortir de Blois, issue de [Bres *et al.* 2022]

**Expérience sur plusieurs outils de traçage d'itinéraires** Dans l'idée d'illustrer les différences entre les jeux de données, nous avons réalisé une expérience présentée dans [Bres *et al.* 2022] qui consiste à réaliser un itinéraire entre Blois et Chambord avec 6 outils différents et de comparer les points forts et les points faibles de chacun. La figure 2.7 présente la manière dont les itinéraires sortent de Blois. Elle montre que les outils proposent des itinéraires présentant des options complètement différentes malgré le fait de privilégier un mode d'itinéraire équivalent et que certains outils (exemples : Strava, Géovélo, Komoot, Mappy) utilisent OSM avec, pour

certains, un raffinement de cette base de données avant l'utilisation. De son côté, Open-Source Routing Machine (OSRM) utilise OSM sans raffinement. Google Maps utilise ses propres données. Nous remarquons au Sud de la Loire que Google Maps utilise une piste cyclable parallèle à la route utilisée par GéoVélo et OSRM. De plus, Mappy emploie un double-sens cyclable et est le seul à le faire dans cette expérience. Nous notons aussi que Komoot emprunte une pente raide à la descente, ce qui peut être dangereux.

De manière générale, les données dédiées au cyclisme ont connu une certaine évolution par rapport au constat réalisé par [Sauvanet 2011]. La BDTOPO® a évolué pour inclure les infrastructures cyclables. OSM a beaucoup grandi et de nombreux organismes (GéoVélo, Strava, Komoot etc.) récupèrent les données d'OSM pour les enrichir.

Après avoir présenté les limitations des BDRM existantes, nous présentons les différentes modélisations du réseau cyclable.

## 2.4 Modélisation du réseau cyclable

De multiples modélisations du réseau cyclable existent. Cette section présente d'abord un modèle d'infrastructures cyclables du point de vue d'une association urbaniste visant à aider le développement du vélo. Ensuite, nous explorons une nouvelle granularité permettant de mieux représenter les différents usages de la route à savoir la voie de circulation. Nous présentons ensuite des modélisations du réseau routier à l'échelle de la voie de circulation.

**Vélo & Territoires** Vélo & Territoires[9] est une association qui a pour but de conseiller les collectivités territoriales dans le développement et la maintenance du réseau cyclable. Dans leur optique d'aider à la maintenance, ils ont développé un modèle de données conceptuel spécifique aux infrastructures cyclables. Ce modèle est très détaillé pour les attributs importants liés au cyclisme et propose des attributs doublés pour les voies secondaires à droite et à gauche d'une route. La version 3.3 de la BDTOPO® s'est même inspirée de cette philosophie pour proposer des attributs cyclables de chaque côté d'un tronçon de route. GéoVélo propose aussi une version d'OSM en accord avec ce schéma pour la France entière. Cette version d'OSM peut être liée aux données originales grâce à l'identifiant OSM du tronçon et une date d'extraction permettant de déduire le numéro de version de chaque tronçon. Cependant, beaucoup d'informations pour la circulation des autres usagers de la route manquent à ce schéma comme les restrictions sur les poids lourds. Deux autres modèles développés par Vélo & Territoires concernent les équipements cyclables et les stationnements cyclables. Pour le modèle des stationnements cyclables, les aménagements doivent être renseignés par une géométrie ponctuelle, ce qui peut être un problème dans le cadre de très grands parkings avec peu d'entrées.

9. https://www.velo-territoires.org/politiques-cyclables/data-velo-modeles-donnees

GéoVélo a proposé le même export à partir d'OSM en appliquant ce modèle mais les objets exportés ont des géométries ponctuelles ou polygonales. Pour le modèle des équipements cyclables, il concerne tout mobilier utile à un cycliste. Cette notion de mobilier est vaste et inclut entre autre les points d'eau potable, toilettes, tables de pique-nique...

Les modèles de Vélo & Territoires, bien que parfaitement construites pour représenter l'usage cycliste, ne permettent pas la représentation des autres usagers de la route. Après avoir étudié les autres BDRM présentées précédemment, nous pensons que les différents problèmes de ces BDRM viennent du fait de représenter les tronçons de route. En effet, une représentation par tronçons ne permet pas de représenter l'ensemble des usages dont une route dispose. Dans ce sens, nous avons cherché une représentation plus fine du réseau routier, à l'échelle de la voie de circulation.

**Véhicules autonomes** Les véhicules autonomes ont besoin d'un fort niveau de détail dans leurs données afin d'amener des passagers en toute sécurité. Pour assurer cette sécurité, les systèmes embarqués dans les véhicules autonomes sont capables d'identifier chaque voie de circulation. Cette notion présente un fort potentiel pour une représentation des infrastructures cyclables dans une base de données géographique car la perception d'un aménagement routier par un cycliste peut juste dépendre d'une seule voie lui étant dédiée avec une bonne sécurité sur celle-ci. [Zakaria *et al.* 2023] ont réalisé une revue des techniques et données utilisées pour détecter des voies. Concernant les techniques de détection des voies, deux familles de méthodes se détachent : les méthodes de modélisation géométrique et les méthodes d'intelligence artificielle. Concernant les données utilisées, elles sont très variées. Beaucoup de données sont récupérées manuellement par les chercheurs à base de Global Navigation Satellite System (GNSS) et de LIght Detection And Ranging (LIDAR). Cependant, [Joshi & James 2015] ont utilisé OSM comme source de données incomplète en le combinant à des données GNSS et LIDAR pour obtenir une carte de voies de très bonne qualité. Les travaux de [Ghiasi *et al.* 2020] représentent aussi un grand intérêt pour les voies dédiées aux cyclistes car ils permettent de détecter des voies de largeurs différentes sur le même tronçon. Cela peut s'avérer très utile dans la détection de bandes cyclables qui ont généralement une largeur trois ou quatre fois inférieure à celles des voies pour les voitures. La granularité de voie, particulièrement intéressante pour stocker de l'information spécifique à un usager, est donc très développée dans le domaine des véhicules autonomes mais absolument pas dans des modèles de données routières pour le grand public. Nous souhaitons explorer cette possibilité en proposant une BDRM cyclable ayant la voie comme granularité.

**Modèle routier à l'échelle de la voie de circulation** Nous n'avons pas trouvé de modèles disponibles à l'échelle de la voie de circulation dans la littérature. Cependant, plusieurs articles présentent des méthodes pour extraire les voies de circulation à partir de données acquises selon différentes modalités.

[Shi *et al.* 2022] proposent une méthode permettant d'extraire les voies de circulation à partir d'images de Street View que les auteurs ont eux mêmes récupérées puis analysées. La caméra est placée au-dessus d'un camion et l'information est couplée à un capteur GNSS pour obtenir la position géographique de la prise de vue. Le réseau à l'échelle de la voie est ensuite construit en détectant les lignes de séparation des voies. Bien que la précision géométrique annoncée soit très bonne (environ 60cm), le coût de récupération des images du réseau routier est beaucoup trop important pour une utilisation de cette approche à l'échelle mondiale ou nationale. De plus, il faut que les tronçons disposent de séparateur de voies et d'une largeur permettant la circulation du véhicule.

Les travaux de [Uduwaragoda *et al.* 2013] mettent en avant la réalisation d'une méthode permettant l'extraction des informations sur les voies en utilisant des traces GPS. La distribution de la densité de probabilités de chaque trace GPS est calculée afin d'obtenir de manière très précise les limites des voies de circulations et une carte très précise. Or, le nombre de trace GPS requises par voie de circulation est d'au moins 150, ce qui est beaucoup trop pour la généralisation à un grand espace rural avec peu de circulation. [Zheng *et al.* 2019] ont aussi proposé une approche à l'échelle de la voie de circulation en essayant de l'instancier avec des traces GPS. Ils mettent en avant des données de l'institut géographique national chinois qui contiennent les lignes du centre de chaque routes. Ces données sont peu communes et très chères à l'achat. Pour compléter ces données dans le cadre des routes avec de nombreuses voies, les auteurs ont récupérés les données d'un véhicule autonome, ce qui est une solution très chère et qui ne permet pas de récupérer beaucoup de données.

Les trois travaux présentés montrent qu'il serait possible d'extraire et récupérer les informations sur les infrastructures routières à l'échelle de la voie de circulation sur une petite zone avec des données difficilement trouvables à l'échelle mondiale. Or, aucun des articles présentés ici ne fournit de modèle conceptuel. De plus, les instanciations réalisées le sont sur des petites zones d'études. Les données sont aussi centrées sur le réseau routier et donc sur l'usage de la voiture. Ces méthodes sont donc assez loin de proposer une solution adaptable à notre cas d'étude.

## 2.5 Conclusion

Le réseau cyclable est une union d'infrastructures dédiées à l'usage du cyclisme et d'autres réseaux comme celui des voitures ou des piétons. De plus, de nombreux usages au sein même des cyclistes sont identifiables comme les commuteurs ou les cyclosportifs par exemple. Ces usages ont des besoins différents et cela amène à de nombreux indices de cyclabilité différents.

En ce qui concerne les données représentant le réseau cyclable, il existe des BDRM orientées vers les piétons et les véhicules à moteurs qui ne permettent pas de représenter l'usage cycliste et inversement. Il est donc primordial de proposer une BDRM qui inclue parfaitement les besoins de l'usage cycliste en permettant aussi

la représentation de tous les usages. Pour cela, la notion de voie utilisée dans le cadre des véhicules autonomes est une idée intéressante car il existe des disparités d'utilisation des voies d'un même tronçon de route pour certains usagers. De manière générale, les BDRM avec une représentation du réseau routier à l'échelle du tronçon de route ne semblent pas pouvoir représenter l'ensemble des usages. C'est pour cela que nous avons enquêté sur la granularité de la voie de circulation qui est plus fine et permet selon nous de mieux représenter les usages.

Enfin, les différentes bases de données étudiés présentent le problème de ne pas avoir une bonne complétude attributaire à l'échelle du tronçon de route. Nous pensons que cette qualité sera encore plus dégradée si nous nous projetons vers l'instanciation d'un modèle à l'échelle de la voie de circulation car l'information est actuellement stockée de manière agrégée par tronçon de route. Par contre, nous pensons que la fusion de plusieurs BDRM entre elles pourrait amener à une BDRM de bonne qualité à l'échelle de la voie de circulation. Une étude de la qualité des données est donc essentielle afin de voir comment la qualité des données est définie et calculée.

Chapitre 3

# Qualité des données

**Sommaire**


**3.1 Définition de la qualité des données . . . . . 33**
3.1.1 Qualité des données de manière générale . . . . . 34
3.1.2 Qualité des données géographiques . . . . . 36
3.1.3 Fraîcheur des données . . . . . 38
**3.2 Analyse de la qualité des données dans OSM . . . . . 40**
3.2.1 Qualité intrinsèque . . . . . 40
3.2.2 Qualité extrinsèque . . . . . 41
3.2.3 Analyse de la fraîcheur et de l'évolution des données OSM . . 42
**3.3 Conclusion . . . . . 45**


Ce chapitre définit la notion de qualité des données et plus particulièrement des données géographiques. Nous souhaitons mettre en avant les différentes définitions de la qualité des données ainsi que ses composantes que ce soit dans le domaine général de la qualité ou dans son application aux données géographiques. De manière analogue, nous définissons la fraîcheur des données. Une fois la fraîcheur définie, nous questionnons cette notion dans le contexte d'une base de données pouvant subir des changements en continu comme OSM. Nous poursuivons avec la mise en oeuvre de ces concepts dans OSM, qui est reconnue comme une base de données avec une qualité hétérogène. Nous portons un intérêt particulier à l'analyse de la fraîcheur dans cette base de données car OSM contient des informations données avec une fraîcheur très variable, comme d'autres projets de l'information géographique volontaire (VGI).

La première section de ce chapitre définit la qualité des données puis se focalise sur la fraîcheur. La seconde section réalise un état de l'art sur la qualité dans OSM avec un intérêt particulier sur la fraîcheur puis, plus précisément, sur l'évolution.

## 3.1 Définition de la qualité des données

Dans cette section, nous définissons la qualité des données de manière générale. Ensuite, nous effectuons une comparaison avec la définition pour la qualité des données géographiques. Nous finissons par définir plus en détails un aspect de la qualité des données, à savoir la fraîcheur, car il s'agit d'un point central de ce travail de thèse.

### 3.1.1 Qualité des données de manière générale

La qualité des données est définie selon la norme ISO 25012 :2008 [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008] comme le degré auquel les données satisfont les prérequis définis par leur propriétaire. Une dimension de la qualité représente un aspect de celle-ci et est décrite par un ou plusieurs facteurs qui sont eux mêmes décrits par une ou plusieurs métriques. La qualité est découpée en plusieurs dimensions dans le modèle de la qualité des données proposé dans la norme ci-dessus. Ces dimensions, au nombre de 15, sont les suivantes : exactitude, complétude, cohérence, crédibilité, actualité, accessibilité, conformité, confidentialité, efficacité, exactitude, traçabilité, compréhension, disponibilité, portabilité et recouvrabilité. De manière générale, l'ensemble de ces dimensions sont regroupées dans deux grandes catégories qui sont la qualité inhérente aux données et la qualité des données dépendante du système d'information. Cette norme ISO est complétée par [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2015] qui défini des métriques pour l'ensemble des dimensions proposées dans [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008]. Ces métriques sont des indicateurs directement calculables sur un jeu de données afin d'obtenir une évaluation d'une dimension de la qualité.

De multiples travaux illustrent le fait que la notion de dimension de la qualité des données n'a pas de consensus dans la communauté, propos qui sont confirmés par [Serra *et al.* 2022]. Dans cette sous-section, nous présentons plusieurs travaux proposant ou utilisant différentes listes de dimensions de la qualité.

En amont des normes ISO, [Batini & Scannapieca 2006] proposaient les dimensions principales de la qualité : l'exactitude, la complétude, l'actualité, la volatilité et la cohérence, auxquelles s'ajoutent d'autres dimensions mentionnées de plus en plus dans la littérature comme l'interprétabilité, la synchronisation entre plusieurs séries temporelles, l'accessibilité et la qualité de la source de données etc.

De leur côté, [Sidi *et al.* 2012] proposent une liste de 40 dimensions de la qualité. Nous retrouvons ainsi les dimensions évoquées par [Batini & Scannapieca 2006] auxquelles s'ajoutent d'autres, telles que l'absence d'erreur (*free of error* dans l'article en anglais) qui peut être liée à l'exactitude, la quantité de données qui peut être liée à la complétude ou la sécurité. Au contraire, d'autres dimensions ne sont pas liées à ce que proposent [Batini & Scannapieca 2006] comme la décroissance des données (*data decay* dans l'article en anglais), ou la facilité d'usage et de maintien à jour par exemple.

Avec la même idée, [Wang *et al.* 2024] proposent une liste de 21 dimensions de la qualité. Le point fort de cet article est le fait de mentionner le nombre d'articles scientifiques utilisant chaque dimension. Les dimensions suivantes disposent d'au moins 5 références dans ce papier : complétude (14), exactitude (12), cohérence (6), fraîcheur (issue des dimensions de *timeliness* et *currency*, 6) et pertinence (5). Dans les dimensions uniques de ce papier, nous retrouvons la non-ambiguïté ou la traçabilité. D'autres dimensions communes existent mais sous des noms différents comme la l'adéquation à l'usage de la donnée chez [Wang *et al.* 2024] qui est l'utilité chez [Sidi *et al.* 2012]. Cette dimension est un déterminant très subjectif car il représente

à quel point une base de données permet de répondre à nos besoins. Il n'y a pas de facteur précis pour estimer l'adéquation à l'usage. Parmi ces travaux, ceux de [Wang *et al.* 2024] proposent les définitions les plus récentes de l'ensemble des dimensions. C'est pour cela que cet article est privilégié pour lister les dimensions de la qualité.

Dans ce manuscrit, nous choisissons les cinq dimensions suivantes : complétude, cohérence, exactitude, fraîcheur et unicité. Pour les quatre premières dimensions, elles sont les plus référencées dans l'état de l'art selon [Wang *et al.* 2024]. Pour l'unicité, elle revient dans les quatre références évoquées précédemment et se retrouve aussi dans d'autres dimensions évoquées par ces articles comme la duplication chez [Sidi *et al.* 2012]. De plus, [Serra *et al.* 2022] et [Akoka *et al.* 2007] référencent aussi ces dimensions de la qualité comme les plus répandues. Nous donnons par la suite une définition de ces cinq dimensions principales de la qualité des données. Après la définition de chaque dimension, nous définissons leurs facteurs selon [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008].

**Complétude** La complétude peut représenter le degré auquel les données ont une ampleur, une profondeur et un champ d'application suffisant pour un travail à réaliser [Wang & Strong 1996]. Elle est représentée par le degré auquel le système fournit l'ensemble de l'information requise [Jarke & Vassiliou 1999, Setia *et al.* 2013, Naumann *et al.* 2004] ou le fait que l'ensemble des parties requises de l'information d'un objet soit présente [Bovee *et al.* 2003]. L'ensemble complet des définitions est résumé dans [Emran 2015].

Deux facteurs représentent la dimension de la complétude : la couverture et la densité [Naumann *et al.* 2004]. La couverture indique dans quelle mesure les objets du monde réel sont représentés dans le système d'information. La densité indique dans quelle mesure ces objets sont décrits à l'aide de tous les attributs nécessaires.

**Cohérence** La cohérence représente le respect des règles appliquées sur les données (aussi bien les règles d'intégrité de la base de données que les règles nécessaires au bon fonctionnement de celle-ci) [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008].

La cohérence est représentée par trois facteurs qui sont l'intégrité de domaine, l'intégrité relationnelle et l'intégrité référentielle [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008]. L'intégrité de domaine consiste à respecter les règles de définition des attributs (par exemple, ne pas avoir d'âge négatif). L'intégrité relationnelle assure le respect des relations entre plusieurs attributs d'une même table de base de données. L'intégrité référentielle représente le respect des relations entre plusieurs tables d'une même base de données ou entre plusieurs bases de données.

**Exactitude** L'exactitude représente le degré auquel les données sont correctes, fiables et certifiées [Wang & Strong 1996]. L'exactitude indique si les données sont valides, sans erreurs et précises [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008]. L'exactitude implique deux facteurs qui sont la correctitude sémantique, la correctitude syntaxique.

La correctitude sémantique vérifie que la base de données puisse représenter les différents états des objets du monde réel. La correctitude syntaxique correspond au fait que les données doivent être dans un domaine de valeurs acceptable [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008].

**Unicité** L'unicité représente le niveau de non duplication des données. Cette dimension est définie par un seul facteur de l'unicité qui est la quantité de données non répétées [Wang & Strong 1996], bien que le nom de ce facteur soit très proche de celui de la métrique correspondante. Elle est aussi étudiée sous l'angle opposé de la duplication [McGilvray 2008].

Ce facteur vérifie que certains tuples ne contiennent pas une information en commun. Par exemple, un tuple $x_1$ dispose d'une information pour les attributs $a_1$, $a_2$, $a_3$ et $a_4$ et un tuple $x_2$ dispose des mêmes informations pour $a_1$, $a_2$ et $a_3$ mais n'a pas d'information renseignée pour $a_4$.

**Fraîcheur** La fraîcheur fait référence aux aspects temporels des données selon [Peralta 2006]. Ces aspects temporels sont les dates de création, mise à jour et dernière vérification des objets. La fraîcheur est définie par deux facteurs qui sont l'actualité et l'âge de la donnée. L'actualité représente le déphasage entre la création/mise-à-jour au monde réel et sa représentation dans le système d'information. L'âge de la donnée définit la vieillesse d'un objet représenté.

Après avoir défini la qualité des données de manière générale, nous souhaitons aborder la même notion sous l'angle des données géographiques afin de mettre en valeur certaines spécificités de ce type de données.

### 3.1.2 Qualité des données géographiques

Cette sous-section définit la qualité des données du point de vue des données géographiques. En effet, ces données comportent des géométries qui demandent un traitement spécial vis-à-vis de la qualité.

La norme ISO 19157 a été très récemment revue pour s'appeler ISO 19157 :1 2023 ([ISO/TC 211 2023]). Elle consiste à expliquer comment évaluer la qualité de données géographiques. Afin de faciliter l'usage de cette norme, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) a publié des fiches explicatives [1]. La norme met en avant les dimensions de la qualité suivantes : cohérence logique, exhaustivité, précision thématique, précision de position et qualité temporelle. Nous allons maintenant expliquer les 5 dimensions de la qualité selon la norme ISO 19157 :1 2023.

**Cohérence logique** La cohérence logique concerne le degré de cohérence interne des données selon des règles de modélisation et de spécifications du produit. Quatre

1. https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/qualifier-donnees-geographiques

facteurs composent cette dimension : la cohérence conceptuelle (respect du schéma conceptuel des données), la cohérence au domaine de valeurs (appartenance d'une valeur à une plage spécifiée), la cohérence de format (ou cohérence syntaxique : adéquation avec la structure physique du jeu de données) et la cohérence topologique (exactitude des caractéristiques topologiques du jeu de données). Les trois premiers facteurs font écho à ceux de la dimension de cohérence évoquée dans la sous-partie précédente quand la cohérence topologique vérifie l'exactitude topologique du jeu de données.

**Exhaustivité** L'exhaustivité se définit comme la présence et l'absence d'entités, de leurs attributs et de leurs relations. Cela implique que l'ensemble des entités existant dans le monde réel sont dans la base de données avec l'ensemble de l'information attributaire. Deux facteurs composent cette dimension : l'excédent et l'omission. Le premier représente un surplus de données ou d'attributs quand le second représente un manque de données ou d'attributs.

**Précision thématique** La précision thématique se définit comme la précision des attributs quantitatifs, la justesse des attributs non quantitatifs, du classement des entités et de leurs relations. Trois facteurs composent cette dimension : la justesse du classement, la justesse des attributs non quantitatifs et la précision des attributs quantitatifs. Ces facteurs font référence à une partie de la dimension de l'exactitude évoquée dans la sous-partie précédente. Les attributs de date ne sont pas comptés dans la précision thématique mais dans la précision temporelle.

**Précision de position** La précision de position se définit comme la précision de la position des entités au sein d'un système de référence spatial [ISO/TC 211 2023]. Deux facteurs composent cette dimension qui sont : la précision absolue et la précision relative. La précision absolue concerne la proximité des valeurs de coordonnées reportées par rapport aux valeurs vraies ou reconnues en tant que telles. Cela correspond à une comparaison avec la position d'un objet dans le monde réel ou dans une base de données de référence. La précision relative concerne la proximité des positions relatives des entités dans un jeu de données par rapport à leurs positions relatives respectives vraies ou reconnues en tant que telles. Cette notion n'existe pas dans la norme de qualité des données de manière générale ISO 25012.

**Qualité temporelle** Dans la norme ISO 19157 :1 [ISO/TC 211 2023], la notion de qualité temporelle remplace partiellement celle de fraîcheur évoquée dans [ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008]. Il s'agit de la qualité des attributs temporels et des relations temporelles entre les entités. Trois facteurs composent cette dimension qui sont : l'exactitude de la mesure temporelle, la cohérence temporelle et la validité temporelle. L'exactitude de la mesure temporelle correspond à l'exactitude des mesures temporelles décrites par rapport aux valeurs acceptées ou reconnues comme vraies. La cohérence temporelle vérifie la justesse de la chronologie des évènements.

La validité temporelle correspond à la validité des données en ce qui concerne les aspects temporels. Parmi ces trois facteurs, la validité temporelle se rapproche un peu de la notion de fraîcheur.

Nous remarquons aussi que la dimension de l'unicité n'est pas présente dans cette norme alors qu'elle est majeure dans la qualité des données de manière générale.

Dans sa définition de la qualité, [Batini & Scannapieca 2006] font aussi mention de dimensions spécifiques aux données géographiques que sont la précision géométrique et la précision attributaire (ou thématique). Cela correspond parfaitement à la norme ISO 19157 :1 2023.

### 3.1.3 Fraîcheur des données

Nous étudions ici en détails la dimension de la fraîcheur des données. Un paragraphe dans les deux sous-sections précédentes ont donné la définition de la fraîcheur pour la qualité des données de manière générale ainsi que de la qualité temporelle pour la qualité dans les données géographiques.

L'état de l'art propose plusieurs métriques liées à la fraîcheur dont les exemples suivants :

— **Précision temporelle**. C'est l'actualité de la base de données vis-à-vis des changements effectués dans le monde réel ([Girres & Touya 2010], [Barron *et al.* 2014]). Cela correspond à la proportion d'objets ajoutés dans la base de données dans intervalle de temps précis.

— **Qualité temporelle**. C'est la validité des changements dans une base de données en relation avec les changements du monde réel et le taux de mise à jour des objets de la base de données ([Haklay 2010]) par rapport au nombre total d'objets. Cette métrique est liée au facteur d'actualité de la donnée.

— **Parenté**. C'est une mesure de la manière dont la donnée est collectée (la source) et comment elle évolue dans le temps ([Girres & Touya 2010], [Haklay 2010]). Dans [Girres & Touya 2010], cette métrique est le taux d'objets géographiques mis à jour qui fait référence à la notion de qualité temporelle de [Haklay 2010].

— **Âge de l'information**. Dans le champ de l'Internet des Véhicules, c'est une mesure de la différence de temps entre le moment où un objet est inséré dans la base de données et le moment où une personne consulte cette base de données ([Kaul *et al.* 2011]). Cette métrique est liée au facteur de l'âge de la donnée.

— **Fraîcheur résiduelle normalisée**. Dans le domaine de l'Internet des Objets cet indicateur borné entre 0 (mauvaise fraîcheur) et 1 (excellente fraîcheur) permet de quantifier la fraîcheur d'un objet afin de la comparer à d'autres objets similaires mais de fraîcheurs différentes [Hail *et al.* 2015]. Cela permet de choisir la bonne information si les deux objets analogues ont des informations divergentes.

L'ensemble de ces métriques montre que les manières de représenter la fraîcheur

des données sont nombreuses. Cependant, ce manuscrit se trouve dans le cadre de l'information géographique volontaire (VGI) et de données mises à jour en continu. Cela nous amène donc à questionner la notion de fraîcheur dans ce cadre précis.

**La fraîcheur dans les VGI** Ce cadre implique que des mises à jour peuvent être faites en continu sur tout objet de la base de données. Un changement peut aussi concerner plusieurs objets tant que ceux-ci sont réalisés en même temps et par le même contributeur. OSM définit ces changements *changeset*. Lorsqu'un *changeset* concerne plusieurs objets OSM dans une zone donnée, peut-on considérer un objet dans cette zone ou très proche de cette zone comme à jour ? Il est ici impossible de répondre à cette question car nous ne connaissons ni la vérité terrain, ni les connaissances et la volonté du contributeur réalisant le *changeset*.

Ce questionnement nous fait comprendre que la notion de fraîcheur ou de qualité temporelle, telle qu'elle est définie dans l'état de l'art, ne peut pas complètement s'appliquer à une base de données subissant des changements en continu comme OSM.

**L'évolution pour analyser la fraîcheur** En conséquence, nous cherchons un nouveau procédé pour analyser la fraîcheur dans une base de données de ce type. Nous pensons que l'analyse de l'évolution d'une base de données nous permet d'analyser les changements que nous avons considérés comme problématiques précédemment. Avec cette idée, nous souhaitons réaliser une analyse de l'évolution d'OSM qui utiliserait soit un historique des changesets soit plusieurs snapshots [2] à des intervalles de temps réguliers. La deuxième approche a été adoptée par [Schmidl *et al.* 2021] dont nous détaillons les travaux dans la prochaine section. Cette analyse nous permet aussi de présenter un problème développé dans [Bres *et al.* 2022] : la différence entre mise à jour et mise à niveau. Une mise à jour est vue comme un changement du monde réel rapidement répercuté dans la base de données. Une mise à niveau est vue comme un problème de qualité autre que la fraîcheur qui est présent depuis longtemps qui vient d'être rectifié. Ces notions de mise à jour et de mise à niveau sont clés dans l'analyse de la fraîcheur de VGI. En effet, nous pensons qu'une évolution des données de manière homogène avec des changements fréquents mais concernant peu de données représente majoritairement des mises à jour du réseau. Dans le cas contraire, des mises à jour massives [Le Guilcher *et al.* 2022] très espacées dans le temps et parfois centrées sur une thématique ou une zone géographique précise suggère une forte proportion de mises à niveau des données.

Après avoir défini la notion de qualité des données et montré les limites de la fraîcheur dans le cadre des VGI, nous présentons dans la prochaine section les différentes méthodes d'analyse de la qualité employées sur les données d'OSM.

2. Un snapshot est un jeu de données représentant l'ensemble des données dans leur version la plus récente par rapport à une date donnée.

## 3.2 Analyse de la qualité des données dans OSM

Cette sous partie réalise un état de l'art assez général sur la qualité des données dans OSM. Nous restreignons cette section à OSM car les analyses de qualité des données sont très nombreuses pour cette base de données, et il représente le projet principal des VGI dans lequel la qualité des données a une place prépondérante. Nous distinguons deux types d'analyse de la qualité : la qualité interne et la qualité externe. La qualité externe représente l'adéquation à l'usage que [Wang *et al.* 2024] ont présenté en tant que *fitness for use*. Cette partie de la qualité étant subjective car dépendante des besoins de chaque utilisateurs, nous nous concentrons dans cette section sur la qualité interne. La qualité interne fait référence à la qualité de la donnée en elle même. Cela correspond à ce que nous avons défini dans la section précédente. Afin d'analyser la qualité interne, il existe deux approches différentes : la manière intrinsèque et extrinsèque. La qualité intrinsèque fait ici référence à une analyse de qualité en n'utilisant que le jeu de données concerné par l'analyse. La qualité extrinsèque consiste à estimer la qualité d'une base de données en la comparant avec une base de données de référence. Chaque manière est détaillée dans une sous-section en incluant les articles analysant à la fois la qualité de manière générale ou une de ses dimensions. En plus de cela, une analyse plus détaillée de la fraîcheur dans OSM à travers le prisme de l'évolution est proposée. Cette section priorise les études analysant la qualité des objets linéaires d'OSM mais présente aussi quelques études sur les autres types d'objets (points, surfaces). Ce choix est justifié par le fait que ce manuscrit est centré sur le réseau cyclable qui est principalement composé de routes représentées par des géométries linéaires.

### 3.2.1 Qualité intrinsèque

La qualité intrinsèque d'une base de données géographiques consiste à analyser sa qualité en ne se servant que de ses caractéristiques propres. Par exemple, [Arora *et al.* 2017] ont proposé une méthode d'analyse de la complétude attributaire d'OSM en utilisant par exemple le numéro de version moyen des nodes et le nombre de tags présents sur chaque version d'un node. [Arsanjani *et al.* 2015] proposent un indicateur de qualité de chaque contribution qui vise à évaluer la précision des données d'OSM en se basant sur le nombre de nodes dans une zone, le nombre moyen d'attributs par objet, le numéro de version moyen et le nombre de contributeurs. Ils se sont servi de cet indicateur pour réaliser des prédictions des futures contributions qui sont proches de la réalité. [Barron *et al.* 2014] a proposé un cadre conceptuel pour analyser les données d'OSM à partir uniquement de son propre historique avec des métriques de qualité. Ces métriques sont basées sur la complétude attributaire concernant l'adressage des bâtiments, le déplacement de géométrie des objets, la cohérence du réseau routier, le nombre de contributeurs etc. [Minghini *et al.* 2018] proposent un indicateur centré sur la précision temporelle, l'actualité et l'héritage des nodes d'OSM dans une ville de Tanzanie avec un maillage en cases hexagonales. La partie concernant la fraîcheur implique un indi-

cateur par case pour la date moyenne de création des objets et la date moyenne de dernière modification des objets. Cependant, la transposablilité à notre cas d'étude sur les géométries linéaires demande un pré-traitement afin d'affecter chaque route à une seule case. [Sehra *et al.* 2017] proposent une analyse du réseau routier en Inde du point de vue de la complétude et de la précision topologique du réseau routier d'OSM. Les indicateurs employés pour la complétude sont triviaux comme distance totale pour chaque valeur du tag *highway*, mais la diversité des valeurs possibles de ce tag (par exemple primary pour les voitures, cycleway pour les cyclistes, path pour les piétons) représente une petite introduction à la notion d'usage. Nous restons cependant sur l'usage principal de chaque way d'OSM. Concernant l'autre partie de son indicateur, elle concerne la qualité extrinsèque et sera développée dans la sous-section suivante.

Le volet le plus récent de la recherche sur la qualité intrinsèque d'OSM concerne l'utilisation de méthodes d'apprentissage automatique comme [Madubedube *et al.* 2021] avec de la classification des contributions réalisées au Mozambique. Après la récupération de l'historique complet des changements sur les données du Mozambique, de nombreuses variables ont été calculées (concernant les contributeurs, les objets édités, la zone géographique éditée et des caractéristiques temporelles). De plus, [Alghanim *et al.* 2021] ont utilisé cinq méthodes d'apprentissage automatique supervisé pour essayer de détecter les erreurs sémantiques concernant les routes dans OSM (tag *highway*) ainsi que pour créer un score de confiance pour les contributeurs. Les données utilisées sont des caractéristiques géométriques et attributaires issues des tags d'OSM.

Les travaux présentés dans cette sous-section reposent exclusivement sur OSM pour analyser sa qualité (au moins une dimension). Cependant, les études de qualité extrinsèque sont beaucoup plus nombreuses dans la littérature.

### 3.2.2 Qualité extrinsèque

La qualité extrinsèque d'OSM consiste à comparer la qualité dans une zone géographique pour un thème donné en utilisant une base de données de référence. Cette approche a été la première à apparaître pour analyser la qualité de cette base de données à un moment où OSM était loin d'être à son niveau de qualité actuel. En effet, [Girres & Touya 2010] ont proposé une analyse de la qualité d'OSM incluant de nombreux aspects de la qualité des données géographiques (précision géométrique, précision attributaire, précision sémantique, complétude, cohérence logique, affiliation et usage). Cet article compare les données d'OSM à celles de la BDTOPO® sur des objets de géométrie ponctuelles, linéaires et surfaciques. En se focalisant sur le réseau routier, [Zhang & Malczewski 2018] proposent une analyse approfondie de la qualité des routes au Québec proposant de nombreux indicateurs comme la longueur des routes, la distance de Levenshtein sur les attributs, la présence de certains attributs ou la date de dernière modification. Dans ces travaux de recherche les données du *Digital Mapping Technologies Inc* servent de données de référence.

Plusieurs analyses vont ensuite se concentrer sur une dimension de la qualité, la

complétude étant la plus représentée dans ces travaux ([Salvucci & Salvati 2022, Herfort *et al.* 2023, Minaei 2020, Klinkhardt *et al.* 2023]). Avec la même idée, [Hochmair *et al.* 2015] ont proposé une analyse de la complétude centrée sur les pistes et les bandes cyclables aux États-Unis. La précision temporelle a été analysée par [Juhasz 2021].

[Arsanjani *et al.* 2013] proposent un indicateur d'évaluation de la qualité des contributeurs en se basant sur ses contributions. On observe que cet indicateur utilise des données institutionnelles de référence (le BKG en Allemagne) pour le calcul de métriques intégrées à son calcul incluant la complétude, la cohérence logique, la précision géométrique, sémantique et temporelle. Les contributeurs sont classés en 5 groupes qui sont débutant, régulier, intermédiaire, expert et professionnel.

Les thèmes d'OSM dont la qualité est évaluée sont variés. Cela comprend le réseau routier ([Minaei 2020]), les bâtiments ([Salvucci & Salvati 2022]), l'occupation du sol ([Dorn *et al.* 2015]) ou les points d'intérêts ([Klinkhardt *et al.* 2023]).

Les travaux de [Sehra *et al.* 2017] sur la méthode d'analyse de la précision topologique du réseau routier reposent sur une comparaison d'itinéraires optimaux. Ces itinéraires optimaux sont adaptés pour la voiture et concernent le calculateur d'itinéraires de Google Maps et OSM avec une application de l'algorithme des plus courts chemins de Dijkstra. Les points de départ et d'arrivée sont définis à l'aide de points d'intérêts.

Cependant, cette approche comporte un problème. Une vérité terrain est nécessaire pour pouvoir évaluer la qualité d'OSM. Or cette vérité terrain n'existe pas partout et quand elle existe, elle peut être payante mais elle peut aussi comporter des spécificités qui ne sont pas mentionnées dans une documentation (par exemple des routes trop courtes pour être renseignées) ou compliquer la comparaison avec OSM.

### 3.2.3 Analyse de la fraîcheur et de l'évolution des données OSM

Cette sous partie propose un état de l'art plus précis visant la fraîcheur et l'évolution des données OSM. L'évolution de données géographiques a été étudiée dans OSM dans une optique plus globale d'analyse de qualité [Ferster *et al.* 2019, Herfort *et al.* 2023, Minghini & Frassinelli 2019, Zhao *et al.* 2015] bien que l'étude de la qualité d'OSM implique l'ensemble des principales dimensions de la qualité comme décrit dans la section précédente.

Beaucoup de travaux présentent la fraîcheur des données via la perspective de l'évolution [Haklay 2010, Ferster *et al.* 2019], l'hypothèse de recherche étant que le temps amène plus de contributeurs, d'usages et potentiellement une meilleure qualité. [Herfort *et al.* 2023, Minghini & Frassinelli 2019] considèrent que l'analyse de l'évolution est représentée avec un centrage sur la complétude. Cela signifie qu'ils analysent l'évolution en se basant uniquement sur la somme des longueurs des tronçons de route.

Une approche de l'évolution d'un réseau se rapproche des travaux de [Neis *et al.* 2011], où l'évolution de la longueur du réseau est analysée de manière

globale en séparant certains types de routes. C'est un point que nous souhaitons utiliser dans nos approches par la suite car nous pouvons adapter cette classification à un usage précis (dans notre cas le cyclisme).

La quantité d'études de l'évolution dans OSM augmente grâce à deux outils d'extraction de données : Geofabrik[3] et le format OpenStreetMap History Data Analysis (OSHDB) [Raifer *et al.* 2019]. Le site web Geofabrik permet de telecharger des jeux de données d'OSM pour de nombreuses régions du monde à plusieurs dates à partir de 2014. Le format OSHDB permet de récupérer des jeux de données d'une région soit à une date précise soit un historique des changements entre deux dates. Après avoir installé son environnement, le format OSHDB est requêtable en java, ce qui lui offre une grande adaptabilité dans le choix de la zone géographique et dans les dates souhaitées. Un exemple d'étude utilisant ce format de données est [Yeboah *et al.* 2021]. Ces outils mettent en avant les deux manières d'analyser l'évolution d'un réseau : l'analyse par contributions et celle par jeux de données. Ces approches de l'évolution ont aussi plusieurs sujets d'analyse. Cela peut être les tronçons de route de manière individuelle ou alors une zone dans son ensemble avec une orientation vers un usage. Nous nommons ces approches respectivement centrée objet (une entité du monde réelle représenté dans la base de données) et centrée usage.

Une analyse par contributions utilise l'historique complet des données d'OSM dans une région pour analyser chaque contribution et déterminer le type de contribution apportée à OSM. Pour l'approche centrée objet, [Novack *et al.* 2022] ont analysé les contributions dans vingt métropoles mondiales et ont présenté la quantité de contributions qui sont un ajout d'objet, une suppression d'objet, une mise à jour géométrique ou une mise à jour attributaire. Le fait de différencier les mises à jour géométriques et attributaires est important car ces deux types de mise à jour demandent des niveaux d'expertise différents. Cependant, cette analyse a eu lieu sur les points d'intérêts, ce qui n'est pas le centre d'intérêt principal de ce manuscrit mais certains points d'intérêts peuvent concerner les cyclistes dans leur pratique.

Selon nos connaissances, aucune analyse par contributions centrée usage n'a encore été réalisé.

Une analyse par jeux de données consiste à regrouper plusieurs états d'une zone géographique et à agréger les changements réalisés entre deux jeux de données consécutifs. De nombreux travaux utilisent une approche centrée objet similaire [Neis *et al.* 2011, Yeboah *et al.* 2021, Zhao *et al.* 2015]. Ces études emploient différents intervalles temporels entre leurs jeux de données (*snapshots*) et des périodes d'études variées. Par exemple, [Neis *et al.* 2011] utilisent des intervalles de 3 mois avec une période d'étude de 4.5 ans. L'intervalle utilisé dans [Zhao *et al.* 2015] est identique avec une période d'étude de 4 ans. Cependant, la notion d'usage que nous souhaitons mettre en place rend cet intervalle de temps trop court. Cela s'explique par le fait que les infrastructures routières de manière générale prennent beaucoup de temps à être construites, impliquant des temps longs pour avoir de nombreux

3. https://download.geofabrik.de/

changements du réseau. De plus, ces études ne permettent pas d'analyser l'usage du point de vue d'un utilisateur précis.

A notre connaissance, seule une étude utilise une approche par jeux de données centrée usage [Schmidl *et al.* 2021]. L'approche est appliquée sur l'usage des voitures et se base sur des itinéraires générés par une méthode de plus courts chemins. Les couples origine/destinations servant à la construction de ces itinéraires sont générés par une simulation de Monte Carlo. La figure 3.1 montre la répartition des points d'origine et de destination générés par la simulation de Monte Carlo.

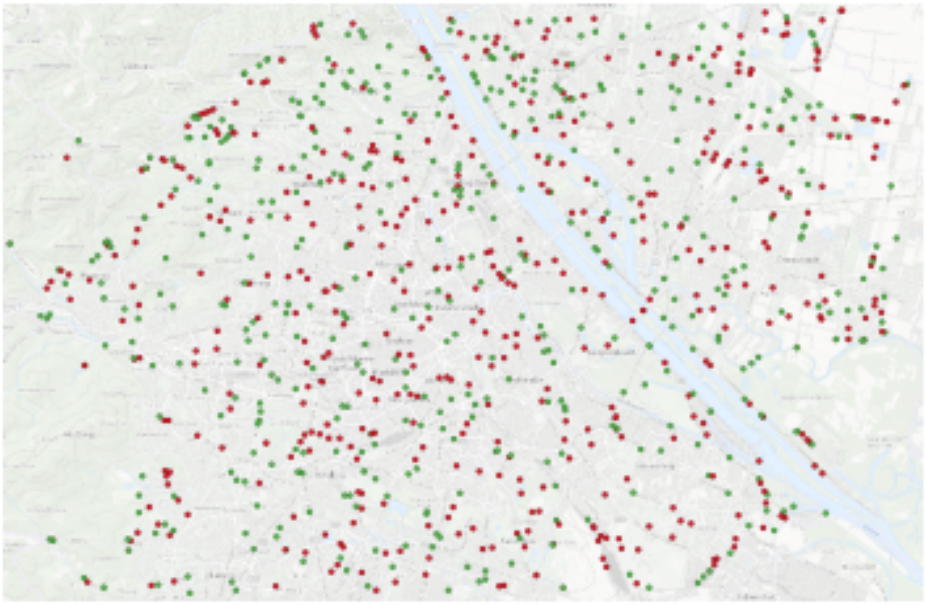


FIGURE 3.1 – Répartition des points d'origine (rouge) destination (vert) dans [Schmidl *et al.* 2021]

Une fois les itinéraires obtenus sur le réseau routier de la villes de Vienne (Autriche) pour 7 années consécutives, ils sont analysés en terme de temps de parcours et de distance. Pour un même couple origine destination, une comparaison plus poussée entre l'itinéraire de 2020 et les itinéraires antérieurs est réalisée.

Cette étude présente un fort intérêt pour nous car cette approche a le potentiel pour être adaptée au cyclisme et à n'importe quelle zone géographique. Par ailleurs, des approches d'analyse du réseau cyclable utilisent des traces GPS comme source de données [Rupi *et al.* 2019]. Cependant, cette approche a un biais qui est qu'une zone dangereuse pour un cycliste ne disposera probablement d'aucune donnée. Cette absence de données serait expliquée par un report modal des usagers vers la voiture ou les transports en communs. Or, l'approche développée par [Schmidl *et al.* 2021] ne rencontre pas ce problème car les couples origine destination sont générés aléatoirement de manière uniforme dans la zone d'étude. La génération d'itinéraires a aussi servi dans un contexte d'évaluation de la précision topologique du réseau routier [Sehra *et al.* 2017], mais cette étude ne présente aucune mention de la fraîcheur.

## 3.3 Conclusion

La qualité des données comprend plusieurs définitions qui présentent des divergences entre la qualité des données non-géographiques et la qualité des données géographiques.

La fraîcheur, est une dimension qui n'est que très peu étudiée lorsque l'on s'intéresse à la qualité des VGI. Cela s'explique par la difficulté d'analyser la fraîcheur des VGI. Nous avons démontré que l'évolution des données est probablement le meilleur moyen d'analyse de la fraîcheur des VGI. Les notions de mise à jour et de mise à niveau sont clés dans la compréhension de l'évolution des VGI.

La qualité des données est un aspect crucial lorsque l'on souhaite utiliser OSM car cette qualité n'est pas connue a priori. De plus, le fait de vouloir analyser un réseau du point de vue d'un usager secondaire de celui-ci rend la tâche encore plus compliquée à cause du manque d'informations relatives à cet usager.

Nous avons vu que les travaux d'analyse de l'évolution d'OSM pouvaient être une analyse par contributions ou par jeux de données et que des déclinaisons de ces approches existent, certaines étant centrées objets et d'autres centrées usage. Les approches centrées usages étant peu développées et centrées sur la voiture, nous souhaitons en adapter une à l'usage du cyclisme.

Cependant, une approche de ce type est non exhaustive, ce qui peut avoir certains biais liés à la non-utilisation de certains tronçons de route inadaptés aux cyclistes dans le cas d'un échantillonnage non stratifié avec un trop faible volume de données. Ces limites sont à prendre en compte dans le développement d'une telle approche.

Chapitre 4

# Outils mathématiques pour le réseau cyclable

**Sommaire**


**4.1 Graphe . . . . . 47**
4.1.1 Définition générale . . . . . 48
4.1.2 Graphes spatio-temporels . . . . . 49
4.1.3 Graphe multiplexe . . . . . 51
**4.2 Algorithmes de plus courts chemins . . . . . 52**
4.2.1 Algorithmes utilisant un graphe orienté valué . . . . . 53
4.2.2 Algorithmes prenant en compte le contexte utilisateur . . . . 56
**4.3 Simulation et échantillonnage . . . . . 57**
4.3.1 Méthodes d'échantillonnage . . . . . 57
4.3.2 Données nécessaires à l'échantillonnage . . . . . 59
**4.4 Conclusion . . . . . 61**


Ce chapitre a pour but de présenter plusieurs outils mathématiques permettant de modéliser et d'analyser l'évolution du réseau cyclable. La majorité des BDRM existantes reposent sur un graphe, et l'étude des évolutions d'un réseau peut être faite à l'aide de l'utilisation de graphe. Aussi, nous introduisons cette notion dans une première section. Par ailleurs, les travaux de [Schmidl *et al.* 2021] expliqués dans le chapitre 3 ont montré le potentiel des algorithmes de plus courts chemins et de simulation pour analyser l'évolution d'un réseau du point de vue d'un usage (voiture). Dans notre thèse, nous nous inspirons de cette démarche dans le chapitre 8, aussi nous présentons donc ces deux notions dans les dernières sous-sections.

## 4.1 Graphe

Cette section a pour but de présenter les graphes de manière générale ainsi que leur utilité dans le cadre de nos travaux. De manière générale, le réseau routier peut être représenté par un graphe. Une première sous-section définit les graphes de manière générale avant de développer les graphes dynamiques et les graphes multiplexes dans les sous-sections suivantes.

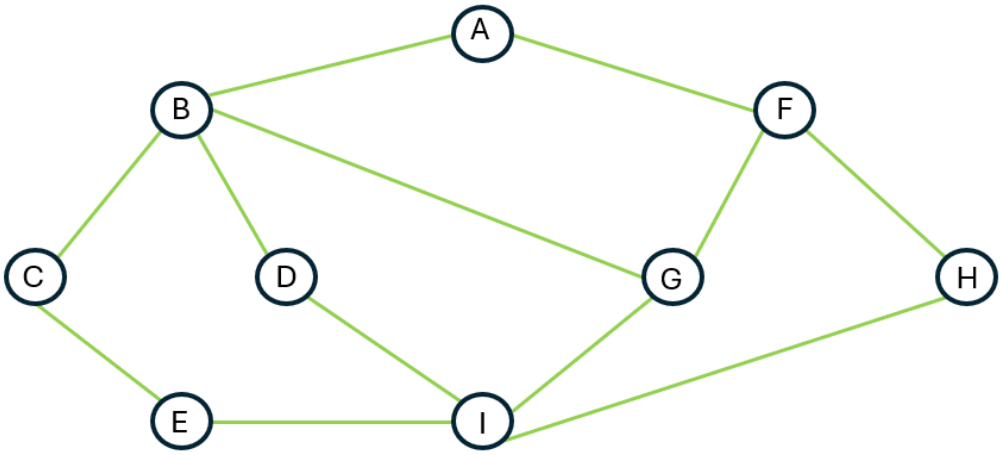



FIGURE 4.1 – Exemple d'un graphe pouvant représenter le réseau routier.

### 4.1.1 Définition générale

Selon [Chang & Nichols 2006], un graphe est une structure mathématique, appelée $G$, qui est composée de deux ensembles nommés $V$ et $E$ tel que $G = \{V, E\}$. L'ensemble $V$ (*vertice*) représente l'ensemble des nœuds présents dans un graphe. Dans le cadre de la représentation d'un réseau de mobilités, $V$ représente l'ensemble des intersections de celui-ci tel que $V = \{v^1, v^2, ..., v^n\}$ [Dale & Fortin 2010]. L'ensemble $E$ (*edge*) représente l'ensemble des arêtes présentes dans un graphe. Dans le cadre de la représentation d'un réseau de mobilités, $E$ représente l'ensemble des routes de celui-ci tel que $E = \{e^1, e^2, ..., e^m\}$. La figure 4.1 illustre les concepts évoqués dans ce paragraphe. Le concept de ce graphe est issu du site pixees.fr [1].

Sur ce graphe, l'ensemble $V$ est composé de $\{A, B, C, D, E, F, G, H, I\}$. L'ensemble $E$ est composé de $\{(A, B), (A, F), (B, C), (B, D), (B, G), (C, E), (D, I), (E, I), (F, G), (F, H), (G, I), (H, I)\}$.

Cependant, dans le monde réel, de nombreuses routes ne sont pas accessibles à tous les usages ou sont réservées à un seul sens de circulation. De plus, les nœuds ayant des distances différentes entre eux, le temps pour aller d'un nœud un autre est très probablement différent. En effet, rien ne peut confirmer que sur la figure précédente, le temps dans le monde réel pour aller de A à B et de C à E soit le même. Pour résoudre ces deux problèmes, les graphes orientés pondérés sont apparus. Dans ce cadre, les nœuds sont reliés par des arcs, qui sont des arêtes avec une direction (sens). Ces arcs sont pondérés par un coût (une valeur numérique est affectée à chacun). La présence d'un arc, n'implique pas la présence d'un arc en sens opposé.

La figure 4.2 est une reprise du premier graphe introduisant certains poids qui peuvent varier en fonction du sens dans lequel un arc est emprunté.

Dans cette figure, l'absence de l'arc $(B, C)$ signifie qu'il n'existe de chemin direct permettant d'aller de B vers C, cependant on peut aller de C vers B car l'arc existe.

1. https://pixees.fr/informatiquelycee/n_site/nsi_term_algo_graphe.html

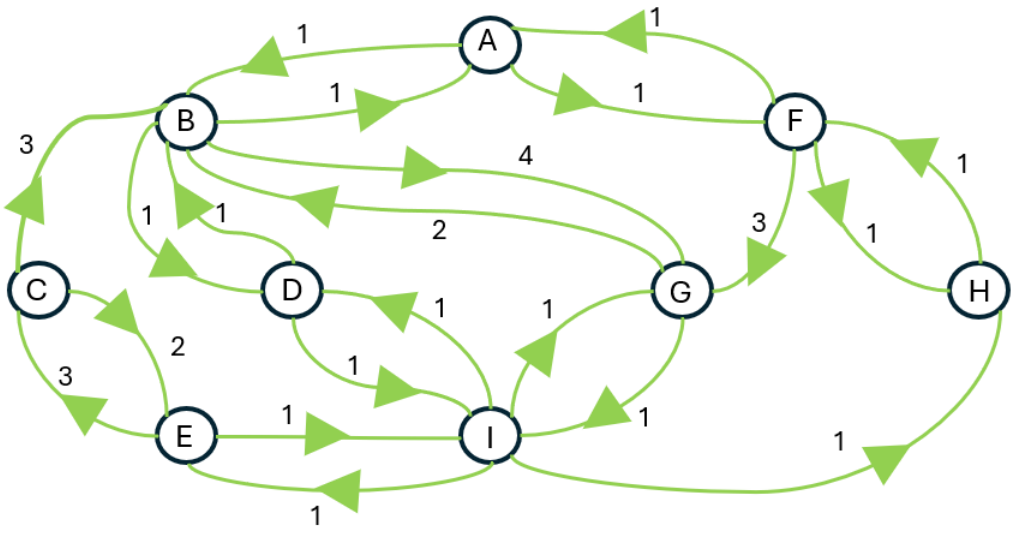



FIGURE 4.2 – Exemple d'un graphe orienté pondéré pouvant représenter le réseau routier

Le poids de 3 de l'arc $(C, B)$ dans cet exemple est la durée mise pour aller de C à B.

Sur ce graphe, nous constatons que pour aller de B à G, il est plus rapide de passer par les arcs $(B, D)$, $(D, I)$ et $(I, G)$ (coût total de 3) au lieu d'emprunter directement l'arc $(B, G)$ (coût total de 4).

Une variante de ce graphe consiste à aussi appliquer des poids sur les intersections. Dans le cadre de croisements compliqués dans des grandes villes, cet indicateur est pertinent pour réaliser des estimations fiables du temps de trajet.

Pour conclure, nous avons introduit les deux graphes les plus connus et simples existant dans la littérature pour représenter le réseau routier. Le graphe orienté pondéré est un parfait mélange des propriétés de sens de circulation du graphe orienté et de temps de parcours du graphe pondéré. Le principal problème des graphes présentés jusqu'ici est qu'ils sont adaptés pour représenter un réseau de mobilités à un instant donné. Or, nous sommes intéressés par l'évolution dans le temps d'un réseau de mobilités et c'est pour cela que la prochaine sous-section concerne les graphes dynamiques.

### 4.1.2 Graphes spatio-temporels

Cette sous-section présente plusieurs types de graphes permettant la modélisation de l'évolution et des dynamiques temporelles de ses arcs et de ses nœuds. Étant donné que le réseau cyclable est souvent illustré sous la forme d'un graphe, plusieurs structures de données étendant les graphes ont été proposées pour représenter les réseaux en constante évolution.

Dans un graphe dynamique, nous recherchons une structure pouvant gérer la

création et la suppression des nœuds et des arcs. De plus, nous souhaitons pouvoir créer une nouvelle version d'un objet (nœud, arc) lors de la modification d'au moins un attribut de chaque nœud ou arc, ceci incluant la géométrie.

Dans le domaine des graphes dynamiques spatio-temporels, [Del Mondo *et al.* 2010] et [Oberoi *et al.* 2017] énumèrent plusieurs graphes qui modélisent le réseau urbain. Le graphe de [Porta *et al.* 2006] inverse le sens commun en définissant les routes comme les nœuds et les intersections comme les arcs. Le problème principal de ce travail est le manque d'attributs pour identifier les tronçons de route dédiés à un usage spécifique. De plus, cette représentation n'est pas adaptée pour générer des itinéraires. Cette étude propose aussi une large revue de la notion de centralité pour justifier ce graphe.

Certains graphes sont orientés vers le web sémantique. [Gutierrez *et al.* 2007] proposent un graphe où le temps est introduit dans le format RDF (Ressource Description Framework), qui est un standard du World Wide Web Consortium (W3C). Ce papier explique qu'un graphe au format RDF a deux moyens d'obtenir la dimension temporelle : une approche par horodatage et une approche par jeux de données. Cela amène à un triplet suivi de deux dates représentant les limites de validité d'un triplet. Ce triplet est composé, comme dans le web sémantique, d'un sujet, d'un prédicat et d'un objet (e.g. le triplet <'Mona Lisa','a pour créateur', 'Léonard de Vinci'>). Ce graphe propose aussi l'option de réaliser un snapshot durant la période d'étude, ce qui ressemble aux différents jeux de données d'OSM que l'on souhaite implémenter pour analyser son évolution.

Un attribut temporel permet de gérer l'évolution d'un attribut dans le temps. Il peut aussi contenir une information à propos du versionnement d'un objet (nœud ou arc). Le stockage du versionnement est important dans le but de conserver l'historique des données d'OSM étant donné que la majorité de ses nœuds et arcs ont plusieurs versions. Ils ont aussi de nombreux tags qui sont assimilés à des attributs. Le principal problème réside dans le fait que les tags sont optionnels, et un tag représentant un attribut peut n'être attaché qu'à une partie des tronçons pour lequel il serait pertinent. Un graphe dynamique avec des étiquettes de durée a été créé par [Wu *et al.* 2014] où chaque arc a une date de début et une durée de validité. Une requête de plus courts chemins doit renseigner une date d'exécution. Ensuite, un graphe est constitué à partir de tous les nœuds et arcs étant considérés comme en cours de validité. Cette représentation a l'avantage d'avoir un faible coût de computation pour exécuter des requêtes.

Les graphes dynamiques temporels sont aussi utilisés dans d'autres domaines comme la prédiction du trafic dans [Shao *et al.* 2022, Wang *et al.* 2020]. Dans ces études, l'implémentation de ce type de graphe se fait dans un réseau de neurones pour prédire le trafic routier. Ces graphes sont trop écartés de notre sujet pour les considérer.

Un graphe multi-couches a été développé par [Costes *et al.* 2015], où plusieurs versions du même jeu de données sont représentées. Le but est de donner une liste de jeux de données pour lesquels une infrastructure routière existe. Ce graphe utilise un espace mémoire important car beaucoup d'objets identiques dans plusieurs jeux de

données sont recréés. Une idée de réduction de ce coût en mémoire serait d'affecter plusieurs couches à une même instance d'un nœud ou d'un arc.

Au final, aucun travail de recherche ne propose un graphe incluant plusieurs jeux de données avec des attributs à la fois sur les nœuds et les arcs ainsi qu'une structure efficiente pour recevoir plusieurs jeux de données d'OSM. L'étude de [Porta *et al.* 2006] propose une structure qui est proche de notre besoin mais il faut inclure des attributs pour stocker l'information attributaire de chaque route qui est présente dans OSM. De plus, afin de réduire la taille du graphe, l'auteur ne conserve pour chaque paire de nœuds qu'un arc (soit (A,B) soit (B,A)) même si l'autre existe dans la vérité terrain. Cela n'est pas souhaitable dans l'analyse d'un réseau. Le graphe multi-couches proposé par [Costes *et al.* 2015] est aussi une solution proche de notre besoin mais nous souhaitons réduire le coût computationel de ce graphe.

Le graphe proposé par [Chu *et al.* 2019] est un graphe multiplexe. Cela signifie qu'il est composé de plusieurs couches qui partagent certains nœuds et arcs entre elles. Cependant, ce graphe a été appliqué sur un graphe non valué. Dans ce sens, nous définissons la notion de graphe multiplexe dans la section suivante.

### 4.1.3 Graphe multiplexe

Le graphe multiplexe, défini également sous le nom de réseau multidimensionnel [Kazienko *et al.* 2011] est un graphe composé de plusieurs couches. Ces couches, composées de nœuds et d'arcs, peuvent avoir certains de ces deux types d'objets en commun. La première sous-section défini formellement un graphe multiplexe avant de présenter son intérêt pour notre cas d'étude dans la seconde sous partie.

**Définition** Nous utilisons le formalisme donné dans [Boccaletti *et al.* 2014, Kivelä *et al.* 2014] comme support à la définition présentée ci-après. Un graphe multiplexe $G$ est un graphe $G = (V, E)$, où $V$ est l'ensemble des sommets et $E$ l'ensemble des liens entre sommets (arrêtes, arcs pondérées ou non). Il est formé à l'aide de $\gamma$ couches $G = \{G^\alpha\}_{\alpha\in[1,\gamma]}$ qui forment chacune un (sous-)graphe $G^\alpha = (V^\alpha, E^\alpha)$, avec $V^\alpha \subseteq V$ et $E^\alpha \subseteq E$. Les couches (sous-graphes) peuvent partager les sommets et liens entre elles. Un graphe multiplexe est donc un graphe tel que $G = \bigcup_{\alpha\in[1,\gamma]} G^\alpha$, $E = \bigcup_{\alpha\in[1,\gamma]} E^\alpha$ et $V = \bigcup_{\alpha\in[1,\gamma]} V^\alpha$.

Par exemple, prenons le cas de graphe multiplexe $G$ composé de deux couches $G^1$ et $G^2$, où $G^1 = (\{v^1, v^2, v^3\}, \{e^1, e^2\})$ et $G^2 = (\{v^1, v^2, v^4\}, \{e^1, e^3\})$. $G^1$ et $G^2$ partagent les sommets $\{v^1, v^2\}$ et l'arc $e_1$. Aussi, $G$ est composé de l'union entre $G^1$ et $G^2$ tel que $G = G^1 \cup G^2 = (\{v^1, v^2, v^3, v^4\}, \{e^1, e^2, e^3\})$. Si on se situe dans un cadre chronologique où $G^1$ précède $G^2$, cela voudrait dire que le réseau a été modifié : $v^4, e^3$ ont remplacé $v^3, e^2$. Le graphe $G$ permet donc au travers ses couches de garder les réseaux et leurs évolutions à différentes dates. Le formalisme évoqué est illustré à l'aide de la figure 4.3.

Sur cette figure, le graphe multiplexe est composé de deux couches où les arcs $e_3^1$ et $e_4^1$ sont identiques. Ils ne sont donc créés qu'une seule fois dans le graphe complet.

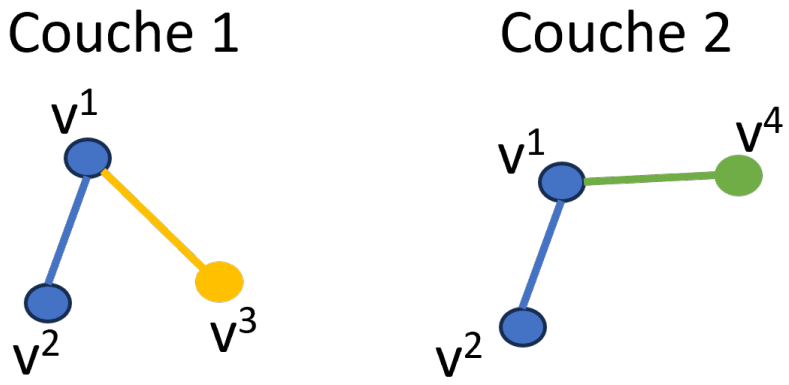



FIGURE 4.3 – Exemple illustratif d'un graphe multiplexe : en jaune les éléments uniquement de la couche 1, en bleu les éléments communs aux deux couches, en vert les éléments uniquement de la couche 2

**Intérêt** Ce type de graphes contient de nombreux intérêts comme l'interconnexion entre les couches qui réduit fortement sa taille par rapport à un graphe multi-couches où l'ensemble des couches sont indépendantes [Kivelä *et al.* 2014].

De plus, ce genre de graphe a déjà été utilisé pour une analyse d'OSM [Truong 2020]. Dans cette thèse, Truong utilise un grand multiplexe pour représenter l'ensemble des modalités de collaborations entre contributeurs sur zone donnée ; chaque modalité correspondant à une couche. L'idée générale est que les couches du graphe multiplexe représentent différentes versions (pour elle, modalités d'interaction, pour nous ce seraient des snapshots) des mêmes objets d'études (pour elle, les contributeurs et leurs intéractions, pour nous les tronçons et leurs intersections).

Ces remarques sur les graphes multiplexes nous font penser que cette structure est parfaitement adaptée à l'accueil de plusieurs jeux de données issus d'OSM afin de réaliser des itinéraires optimaux.

Les graphes sont utilisés pour répondre à différents besoins. Parmi eux, un besoin fondamental est la recherche du plus court chemin. Nous détaillons ce problème dans la section suivante.

## 4.2 Algorithmes de plus courts chemins

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'évolution du réseau cyclable au travers des usages en nous inspirant des travaux présentés dans [Schmidl *et al.* 2021]. Ces derniers reposent, dans un premier temps, sur l'utilisation de générateur d'itinéraires entre deux points de l'espace. Ces générateurs utilisent des algorithmes cherchant à résoudre le problème du plus court chemin. Ce dernier est résumé par [Yu & Yang 1998] comme le fait de trouver le chemin le plus court entre deux nœuds d'un même graphe. Ce chemin le plus court correspond à la somme des poids de

chaque arête du graphe qui est empruntée entre le point de départ et le point d'arrivée. Dans cette section, nous nous plaçons dans le cadre d'un graphe orienté pondéré. Des variantes de ce problème existent en suivant certaines contraintes appliquées sur le graphe comme le cas d'un graphe orienté, dynamique ou temporel. De nombreuses applications des algorithmes issus de ce problème existent comme en planification d'itinéraires, contrôle du trafic, recherche de chemins dans les réseaux sociaux et les jeux-vidéos ([Madkour *et al.* 2017]).

### 4.2.1 Algorithmes utilisant un graphe orienté valué

Pour résoudre ce problème, plusieurs algorithmes ont été développés. [Abu-Ryash & Tamimi 2015] listent quatre algorithmes qui sont expliqués succinctement dans la suite de ce manuscrit et la référence citée compare ces derniers sur leur capacité à utiliser des arcs avec une pondération négative et leur complexité par exemple. A ces algorithmes, nous en ajoutons un cinquième qui est l'algorithme A*.

**Algorithme de Dijkstra** L'algorithme de Dijkstra [Dijkstra 1959] est la première référence sur les algorithmes de plus courts chemins mais aussi la plus connue à l'heure d'aujourd'hui. Cet algorithme s'applique dans le cadre de tout graphe pondéré avec des poids positifs. L'algorithme 4.1 représente le fonctionnement détaillé de cette méthode.

Cet algorithme a besoin d'un graphe et d'un nœud source pour être lancé. D'abord, il initialise un vecteur donnant l'ensemble des distances entre la source et les nœuds du graphe (ligne 7). On termine la phase de préparation en ajoutant tous les nœuds excepté la source dans Q (ligne 9). A partir de maintenant, nous répétons l'ensemble des étapes à venir jusqu'à ce que l'ensemble des nœuds aient une distance par rapport à la source (ligne 12). On cherche le nœud ayant la plus courte distance de notre source (ligne 13). On enlève ce nœud de Q car nous allons lui affecter sa valeur de plus court chemin depuis la source (ligne 14). On va ensuite aller voir l'ensemble des voisins du nœud sélectionné à l'étape précédente en excluant les points déjà visités (ligne 15). On calcule un poids alternatif pour aller à chaque nœud voisin en passant par le nœud sélectionné (ligne 16) puis on compare ce poids avec le poids trouvé au départ (ligne 17). Si le poids trouvé en ligne 16 est plus faible alors on met à jour notre valeur de plus courts chemins pour ce nœud. Cet algorithme calcule les distances de l'ensemble des nœuds au nœud de départ, en calculant pour chaque nœud accessible une distance provisoire. Ensuite, il fixe itérativement les distances, en choisissant à chaque fois le nœud de plus faible distance provisoire (qui ne peut plus évoluer).

**Multi-level Dijkstra et *customizable route planning*** Le *customizable route planning* (Customizable route planning (CRP)) est une méthode d'amélioration de l'algorithme des plus courts chemins de Dijkstra lorsque l'on travaille sur un très grand graphe et que l'on souhaite modifier les poids des arcs en accordance avec

**Algorithme 4.1** Algorithme de Dijkstra pour les plus courts chemins (adapté de l'algorithme de Wikipedia)

```
1: dist ← array[graphe.noeuds.taille]
2: source ← noeud de depart
3: prev ← array[graphe.noeuds.taille]
4: Q ← graphe.noeuds
5: fonction DIJKSTRA(graphe,source)
6:     pour tout noeud n dans graphe.noeuds faire
7:         dist[n] ← infini
8:         prev[n] ← indefini
9:         ajouter n dans Q
10:    fin pour
11:    dist[source] = 0
12:    tant que Q.taille > 0 faire
13:        u ← noeud de Q avec min(dist[u])
14:        supprimer u dans Q
15:        pour tout voisin v de u dans Q faire
16:            alt ← dist[u] + graphe.arcs(u, v)
17:            si alt<dist[v] alors
18:                dist[v] ← alt
19:                prev[v] ← u
20:            fin si
21:        fin pour
22:    fin tant que
23:    retourne dist, prev
24: fin fonction
```

des variables liées à ces arcs. Trois étapes sont nécessaires pour réaliser le CRP [Hamme 2013, Delling *et al.* 2017]. D'abord, une famille de partitions sur les nœuds du graphe est créé. Les cellules de la partition forment un graphe de cellules. Ensuite, l'étape de personnalisation du graphe à un cas d'étude est réalisé en créant un nouveau graphe de cellules. C'est ici que le coût à partir des tags d'OSM va être ajouté au graphe de cellules. Pour finir, on applique l'algorithme de multi-level Dijkstra [Denardo & Fox 1979] (Multi-layer Dijkstra (MLD)). Le pseudo code de cet algorithme se trouve dans [Hamme 2013]. Les principales différences sont l'ajout des cellules à l'algorithme qui sont maintenant dans le vecteur que l'on souhaite vider à la ligne 12 de notre explication de l'algorithme 4.1. La boucle finale quand à elle, itère sur l'ensemble des nœuds d'une seule cellule à la fois. La méthode CRP permet de grandement accélérer le coût d'utilisation de l'algorithme des plus courts chemins par rapport à la version originale de Dijkstra.

Ces algorithmes sont utilisés comme approche par défaut dans l'outil de génération d'itinéraire OSRM [Luxen & Vetter 2011] qui exploite les données d'OSM pour déterminer des plus courts chemin optimaux en fonction de préférences.

**L'algorithme A*** L'algorithme A* [Hart *et al.* 1968] est une extension de celui de Dijkstra qui repose sur le fait de trouver un chemin optimal entre deux nœuds connus d'un graphe de manière rapide. Cette version de l'algorithme repose sur une heuristique (assez souvent la distance à vol d'oiseau) pour commencer l'élaboration du chemin optimal. Cet algorithme est réputé pour être rapide et n'occuper que peu de place en mémoire mais ces avantages peuvent être au détriment de l'exactitude des résultats.

**L'algorithme de Bellman-Ford** L'algorithme de Bellman-Ford [Bellman 1958, Ford 1956] a été conçu pour générer un plus court chemin dans un graphe contenant des poids négatifs. Les poids négatifs peuvent former une boucle infinie dans le calcul du plus court chemin dans un graphe. C'est pour cela que certains algorithmes comme celui de Dijkstra font l'hypothèse que tous les poids sont positifs. L'aspect des poids négatifs n'étant pas traité dans le cadre d'un réseau de mobilités, cet algorithme n'est pas au centre de nos occupations.

**L'algorithme de Floyd-Warshall** L'algorithme de Floyd-Warshall [Floyd 1962] permet de calculer les plus courts chemins entre l'ensemble des nœuds d'un graphe. Il fonctionne aussi bien sur un graphe avec des coûts positifs que négatifs. Il repose sur le fait d'utiliser un nouveau nœud comme nœud intermédiaire à chaque itération. Il fonctionne de amnière récursive, ce qui accélère grandement ses performances.

**L'algorithme de Johnson** L'algorithme de Johnson [Johnson 1977] calcule les plus courts chemins entre l'ensemble des nœuds d'un graphe orienté pondéré. Son efficacité est plus grande quand le graphe est creux, c'est à dire que son nombre d'arcs n'est pas très élevé par rapport à son nombre de nœuds. L'algorithme utilise

d'abord celui de Bellman-Ford pour supprimer les poids négatifs avant d'employer l'algorithme de Dijkstra.

Les algorithmes de plus courts chemins sont très nombreux dans la littérature. Cependant, ils permettent uniquement de donner le chemin le plus court entre un point A et un point B. Or, la prochaine sous-section illustre plusieurs variables demandant une amélioration de ces algorithmes.

### 4.2.2 Algorithmes prenant en compte le contexte utilisateur

Plusieurs variables doivent être ajoutées afin de proposer des itinéraires optimaux réalistes par rapport aux conditions du réseau et à l'usage de celui-ci. Dans cette sous-section, nous évoquons l'impact du trafic routier en continu ainsi que de l'usage cycliste dans les algorithmes de plus courts chemins.

**Plus courts chemins prenant en compte le trafic en continu** Un nouveau défi pour les algorithmes de plus courts chemins est arrivé lorsque la géolocalisation est apparue sur nos téléphones portables. En effet, la possibilité d'utiliser un GPS qui adapte son itinéraire aux conditions du trafic routier a été une vraie révolution. Pour réaliser cela, [Ziliaskopoulos & Mahmassani 1993, Cooke & Halsey 1966] ont réalisé des algorithmes de plus courts chemins prenant en compte des informations temporelles dans leur graphe. Le premier prend en paramètre une date de départ pour lancer l'algorithme de plus courts chemins qui est une variante de celui de Dijkstra. La structure du graphe pour stocker cette information repose sur le principe de *backward star* [Dial *et al.* 1979]. Le second algorithme propose une variante de l'algorithme de Bellman-Ford avec un nombre fini d'itérations pour trouver le plus court chemin entre deux nœuds. La notion temporelle est aussi présente car il faut renseigner le moment du départ de l'itinéraire optimal.

**Plus courts chemins multi-objectifs** Le problème que nous remarquons avec les algorithmes cités jusqu'ici est le fait qu'ils ne cherchent à maximiser qu'un seul critère. Cependant, la génération d'itinéraires optimaux pour l'usage du cyclisme ne correspond pas au chemin le plus court pour réaliser l'itinéraire [Lu *et al.* 2018]. Nous devons tenir compte des cinq critères de [Ahmed *et al.* 2024] détaillés dans le chapitre 2. [Holzer *et al.* 2008] ont proposé un algorithme de génération d'itinéraires multicritères. Cet algorithme repose sur la création d'une partition à plusieurs niveaux. Le but ici est de choisir certains critères à maximiser afin d'accélérer le temps d'exécution de l'algorithme des plus courts chemins. Or, dans le cadre de nos travaux, nous ne pouvons pas choisir les critères que nous devons maximiser. Par exemple, une route non sécurisée pour les cyclistes ou une route à forte pente sont des problèmes qui vont contraindre beaucoup de potentiels cyclistes à se reporter vers d'autres modes de transports.

**Plus courts chemins pour l'usage cycliste** Dans l'optique d'une utilisation pour le cyclisme [Sauvanet 2011], a développé un outil de génération d'itinéraires

accordant une plus grande priorité à certains critères comme la sécurité ou l'attractivité. Ces travaux seront par la suite implémentés dans l'outil de génération d'itinéraires cyclables GéoVélo [2]. Or, il est impossible pour le grand public d'utiliser l'outil de traçage d'itinéraires de GéoVélo sur des données anciennes. L'outil développé par [Ouyang *et al.* 2014] priorise la sécurité dans la génération d'itinéraires, ce qui ne correspond qu'à une partie des usages de ce mode de transport (tourisme et loisir).

L'outil OSRM [Luxen & Vetter 2011] peut permettre d'effectuer ce type d'opérations. Il utilise un jeu de données d'OSM sur une zone donnée à un temps donné et peut réaliser des itinéraires optimaux multi-critères exploitant la CRP. Il peut être adapter à l'usage cycliste, comme vous pourrez le voir dans la suite de cette thèse et comme utilisé dans le chapitre 2.

Pour conclure, les algorithmes de plus courts chemins ont d'abord été développés pour naviguer dans un graphe. Très rapidement, des utilisations spécifiques eux réseaux routiers ont émergé et l'usage cycliste est une évolution qui n'a pas encore connu son point culminant à cause de l'absence de modèle de données parfaitement adapté constatée dans le chapitre 2. Cependant, nous avons aussi remarqué un autre problème dans la génération de ces itinéraires optimaux pour le cyclisme. Cela concerne le choix des points de départ et d'arrivée dans une analyse de réseau. Afin de répondre à cette problématique, nous évoquons dans la prochaine section des notions liées à la simulation et l'échantillonnage.

## 4.3 Simulation et échantillonnage

Comme indiqué précédemment, pour l'analyse des évolutions par l'usage, nous nous inspirons dans cette thèse de l'approche par simulation d'itinéraire proposé dans [Schmidl *et al.* 2021]. Dans ce contexte, pour pouvoir générer des itinéraires représentatifs, il exploite des méthodes de simulations et d'échantillonage [Barnett 1974, Eldar 2015], pour la génération des points de départ et d'arrivée de ces itinéraires. Cela est fait dans l'objectif de permettre de généraliser les résultats à l'échelle du territoire.

### 4.3.1 Méthodes d'échantillonnage

D'abord, rappelons ce qu'est un échantillon. Nous définissons une population D qui est composée de N individus selon l'équation (4.1).

$$D = X_1, X_2, ..., X_N \tag{4.1}$$

Au sein de notre population D, nous souhaitons sélectionner un nombre déterminé d'individus, qui forment l'ensemble S. [Ghojogh *et al.* 2020] mettent en avant de nombreuses méthodes permettant de composer S à partir de D. Dans cette sous-section, nous allons voir ces différentes méthodes.

2. https://geovelo.app/fr/route/

**Échantillonnage simple aléatoire** L'échantillonnage simple aléatoire consiste à tirer au sort un échantillon S d'une taille déterminée dans notre population D sans remettre dans la population un élément tiré précédemment [Barnett 1974].

**Bootstrapping** Le bootstrapping est une méthode d'échantillonnage simple aléatoire qui consiste à tirer au sort un échantillon S d'une taille déterminée dans notre population D en remettant dans la population chaque individu tiré au sort. Tous les individus ont la même probabilité d'être tirés au sort [Pathak 1962]. Cette approche semble plus adaptée à de la génération de points de départ et d'arrivée car certains lieux ont une très grande importance dans les usages du cyclisme.

**Échantillonnage stratifié** L'échantillonnage stratifié consiste à découper la population de départ en plusieurs strates [Barnett 1974]. Chaque strate de la population est identifiée par une caractéristique précise (par exemple l'âge, le sexe etc.). Une fois la population stratifiée, l'échantillonnage est réalisé en tirant au sort un nombre déterminé d'individus dans chaque strate. Le nombre d'individus tirés au sort dans chaque strate peut varier.

**Échantillonnage par clusters** L'échantillonnage par clusters consiste à créer aléatoirement des groupes indépendemment des caractéristiques des individus. Une fois ces groupes réalisés un tirage aléatoire est réalisé de la même manière qu'un échantillonnage stratifié [Barnett 1974].

**Simulation de Monte-Carlo** Une simulation de Monte-Carlo permet de réaliser un tirage aléatoire dans une distribution de probabilités depuis laquelle on ne peut pas réaliser de fonction de distribution cumulative [Hammersley & Handscomb 2013, MacKay 2003]. De nombreuses méthodes de simulation de Monte-Carlo existent mais nous nous attardons dans ce manuscrit uniquement sur le cas d'une méthode simple. Une méthode simple consiste à tirer un nombre déterminé variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (iid) $X_1, X_2, ..., X_n$ suivant une même loi de probabilité $X$. La simulation de Monte Carlo va chercher à estimer l'espérance de cette probabilité avec la formule suivante. Dans cette formule, n est le nombre de variables aléatoires tirées.

$$\mu_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} X_k$$

La différence entre une simulation de Monte Carlo et le bootstrapping consiste dans le fait que la simulation de Monte Carlo est applicable à des variables continues. Dans le cas de la génération de points de départ et d'arrivée, nous pouvons penser à générer aléatoirement la latitude et la longitude des points de départ et d'arrivée des itinéraires. L'algorithme 4.2 illustre la simulation de Monte Carlo dans le cas très simple d'une génération d'un nombre réel entre 0 et 1 réalisé 40 fois.

**Algorithme 4.2** Algorithme de simulation de Monte Carlo

```
1: x ←[]                                  ▷ Variable stockant le résultat de chaque itération
2: n ← 40                                 ▷ Variable stockant le nombre de simulations
3: pour tout i ∈ [1, n] faire
4:     x[i] ← random(1, 6)   ▷ random fournit un nombre réel compris entre 0 et 1 inclus
5: fin pour
```

Dans cet algorithme, nous cherchons à générer 40 nombres réels compris entre 0 et 1. Nous stockons ensuite l'ensemble des résultats dans la liste $x$. $x$ est un échantillon représentatif de la variable continue à observer (ici un phénomène aléatoire). Nous pouvons avoir une vision de la variable aléatoire observée à l'aide de cet échantillon : évaluer son comportement moyen, sa variance, etc. Les simulations de Monte Carlo permettent donc entre autre de pouvoir obtenir des ensembles discrets de valeurs représentatives du comportement global d'une ou plusieurs variables continues.

Maintenant que nous avons vu les différentes méthodes d'échantillonnage, nous allons mettre en avant les différentes données à notre disposition afin de déterminer la meilleure méthode à appliquer dans notre cas.

### 4.3.2 Données nécessaires à l'échantillonnage

Afin de générer les points de départ et d'arrivée, la méthode la plus simple consisterait à utiliser une simulation de Monte-Carlo. La simulation de Monte-Carlo donnerait une latitude et une longitude qui formeraient un point dans notre zone d'intérêt. Cette méthode a été employée par [Schmidl *et al.* 2021]. Cependant, cette approche, bien que facilement implémentable, peut être grandement améliorée par de nombreux jeux de données et une autre méthode d'échantillonnage. La suite de cette sous-section donne de nombreux exemples de données amenant à une amélioration de cette méthode.

**Génération de points d'intérêts pour le cyclisme** Utiliser comme points de départ et d'arrivée des points d'intérêt pertinents pour les cyclistes est une idée utilisée par [Sehra *et al.* 2017]. La base OSM contient l'ensemble de ces points d'intérêts mais avec certains tags qui diffèrent (exemple : *amenity* = *restaurant* pour les lieux de restauration, leisure = sports_center pour les gymnases).

Or, ce manuscrit met en avant dans le chapitre 2 les différents usages du cyclisme qui n'avaient pas été regroupés dans un seul document. Cela implique qu'il n'y a aucune ressource donnant une information sur la proportion de chaque usage dans la pratique du cyclisme.

**Utilisation de l'enquête ménages déplacements pour déterminer les usages du cyclisme** Certaines données de mobilités pourraient permettre d'in-

férer la proportion de chaque usage du cyclisme. L'enquête ménages déplacements (EMD) est créée dans les années 2010 par le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU) et a pour but d'identifier les pratiques des déplacements des français. Dans ces enquêtes, les déplacements doivent être renseignés, y compris le point de départ, le point d'arrivée ainsi que le mode de transport. Cela pourrait donc représenter une source de données vérifiée pour les points de départ et d'arrivée de nos itinéraires optimaux. Cependant, le cyclisme au moment de ces enquêtes était encore sous-développé et ne représentait que 2% des déplacements selon [Quetelard 2013].

Cette étude illustre tout de même le potentiel qu'une enquête sur les différents types de déplacements à vélo pourrait avoir. En effet, une étude donnant la part de chaque pratique du cyclisme dans l'usage global permettrait ensuite de réaliser un échantillonnage stratifié sur des lieux correspondants à ces déplacements (par exemple, 30% de l'usage cycliste est du vélo entre le domicile et le travail/école, donc 30% des itinéraires doivent avoir leur point de départ ou arrivée qui est un potentiel lieu de travail ou une école). Des études concernant certains usages du cyclisme existent comme celle du CEREMA centrée sur les vélos à assistance électrique [3] ou celle du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires [4]. Cette dernière montre que l'usage de ce vélo pour aller au travail représente la moitié des déplacements avec ce type de vélo. Cependant, ces vélos ont un coût important, ce qui fait que les étudiants et les lycéens ont plutôt tendance à utiliser un vélo classique. De son côté, l'ADEME met en avant le fait que le cyclisme en France est encore principalement perçu comme un loisir [5].

**Estimation du potentiel d'attractivité d'un lieu** Certaines données permettent d'établir un *potentiel d'attractivité* pour un lieu donné. Pour un grand immeuble, cela peut se traduire par le nombre de logements qui le compose, pour une usine, cela peut être le nombre de salariés qui y travaillent et pour un monument, cela peut être le nombre de visiteurs par jour. Tout cela en tenant compte de la proportion du cyclisme dans la totalité des déplacements permet de réaliser une estimation du *potentiel d'attractivité* d'un lieu et ainsi attribuer un poids plus fort aux lieux ayant un potentiel plus élevé. Une fois transformé en classes, le potentiel d'attractivité pourrait servir de variable discriminante en amont d'un échantillonnage stratifié pour choisir les points de départ et d'arrivée.

En conclusion, l'échantillonnage représente un sujet important pour la création des points de départ et d'arrivée des itinéraires optimaux pour le cyclisme. Il peut être réalisé sur des coordonnées choisies aléatoirement dans une zone d'étude mais aussi sur des POI. La couverture d'un territoire étant une combinaison de variables

3. https://www.cerema.fr/fr/actualites/chiffres-cles-mobilite-velo-assistance-electrique-pratique

4. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DGITM_Enquete%20Nationale%20-%20Usage%20du%20VELO%20-%20Resultats%202023_0.pdf

5. https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2023/05/LObSoCo_La-France-a-velo_Communique-de-presse-1.pdf

continues, à minima latitude/longitude, son échantillonage doit de préférence être fait à l'aide de méthode adaptée à ce type de variable. Les différentes données utilisables pour réaliser le meilleur échantillonnage possible ainsi que la méthode utilisable grâce à ces données sont résumées dans le tableau 4.1.

| Méthode d'échantillonnage | Couverture représentative d'un territoire | Points d'intérêts d'OSM | Potentiel d'attractivité |
|---|---|---|---|
| Simulation de Monte-Carlo | X | | |
| Échantillonnage stratifié | | X | X |
| Bootstrapping | | X | |
| Échantillonnage aléatoire simple | | X | |

TABLE 4.1 – Méthodes d'échantillonnage avec les données nécessaires à leur réalisation

Ce tableau illustre parfaitement le fait qu'une simulation de Monte-Carlo est la méthode d'échantillonnage nécessitant le moins de données et de préparation pour être utilisée bien que d'autres méthodes pourraient proposer des résultats plus fidèles à l'usage du cyclisme. Le manque de définition claire du réseau cyclable et de ses usages illustré dans le chapitre 2 est un élément déterminant dans le choix de la simulation de Monte Carlo car nous ne trouverons pas les données parfaites pour réaliser un échantillonnage de meilleure qualité.

## 4.4 Conclusion

Les graphes représentent un atout majeur dans la modélisation du réseau cyclable. Ils ont pendant longtemps permis de représenter les réseaux de mobilités à un instant donné. Or, nous souhaitons représenter les évolutions de ce réseau cyclable et c'est pour cette raison que nous avons cherché des graphes dynamiques afin de les représenter. Parmi ces graphes dynamiques, les graphes multiplexes semblent être les plus adaptés à nos besoins d'implémenter plusieurs snapshots d'une même base de données à différents temps.

La génération d'itinéraires optimaux était un sujet important dans la découverte des graphes. En effet, lorsque le réseau routier a été utilisé comme cas d'étude pour un graphe, le potentiel de celui-ci était immédiatement compris et rapidement utilisé pour ce qui deviendra plus tard le socle du GPS. Cependant, notre cas d'application aux itinéraires cyclables représente un problème multi-critères qui a été entrepris dans l'état de l'art mais qui n'est pas encore optimisé étant donné la qualité des données insuffisante des BDRM à disposition.

Avant d'obtenir les itinéraires optimaux, nous avons besoin de définir leurs points

de départ et d'arrivée dans la zone d'intérêts. Pour cela, nous avons réalisé un tour d'horizon des méthodes d'échantillonnage avant de lister les données nécessaires à l'application de celles-ci. Nos conclusions sur cette partie sont que la simulation de Monte-Carlo représente la méthode la plus facilement implémentable mais les autres solutions, surtout l'échantillonnage stratifié mérite une attention future car le potentiel de cette méthode est grand. Ce potentiel est la conséquence des nombreux jeux de données impliqués dans la préparation de cet échantillonnage.

# Discussion

Le réseau cyclable est composé de l'union des infrastructures cyclables et de parties de celles des réseaux des piétons et des véhicules à moteurs. Ces infrastructures présentent toutes un degré différent de sécurité pour les cyclistes, les pistes cyclables représentant le meilleur type d'infrastructures possibles. Cependant, ces classes d'infrastructures cyclables sont insuffisamment définies pour l'usage cycliste dans la littérature. Le réseau cyclable a aussi un usage très diversifié avec des motifs d'utilisation obligatoires (corvées, déplacement domicile/travail) et des motifs non obligatoires (déplacement sur un évènement, vélo pour le loisir, tourisme). Ces différents types de déplacements entraînent la création de plusieurs types de cyclistes qui n'ont ni la même perception de l'environnement, ni les mêmes besoins. Ces besoins sont regroupés dans cinq grandes catégories qui sont : la cohérence, la directitude, la sécurité, l'attractivité et le confort. C'est pour cela que le chapitre 5 définit, du point de vue de l'usage, le réseau cyclable en fonction des cinq grands critères de la cyclabilité. Ces critères représentent une source de recherche pour l'inclusion de données spécifiques à l'usage cyclistes. Cela fournit donc des premiers éléments de réponse à la question de recherche $\mathcal{Q}1.4$ de l'Introduction.

Nous remarquons aussi que les BDRM actuelles ne sont pas adaptées à l'usage du cyclisme. Cela est principalement expliqué par la modélisation de ces BDRM à l'échelle du tronçon de route qui met en avant l'usage principal de chaque tronçon sans se préoccuper des usages secondaires de ceux-ci. Cette idée permet de répondre à la question de recherche $\mathcal{Q}1.3$ posée lors de l'Introduction. Avec l'idée d'un changement de granularité, le chapitre 6 présente notre BDRM adaptée à l'usage du cyclisme d'un point de vue attributaire mais prenant en compte l'ensemble des usages de la route dans sa modélisation. La principale nouveauté de cette BDRM par rapport à l'existant est la prise en compte des voies de circulations comme une classe à part entière au lieu de ne fournir que le nombre de voies dans un attribut de la classe des tronçons de route. Le chapitre 7 présente l'instanciation de cette BDRM avec les données existantes.

La qualité des données a plusieurs définitions concernant les dimensions qui permettent de l'évaluer. Dans le chapitre 3, nous avons vu que la fraîcheur des données était difficilement analysable pour les VGI. L'approche de changement en continue par objet d'OSM n'implique pas que si un de ses objets (e.g. tronçon, intersection) ait été modifié, que ceux dans son voisinage sont toujours d'actualité dans le monde réel. Si un objet (contribution) OSM n'est pas modifié, cela est-il causé par une absence de besoin d'un changement, une absence de la connaissance de la nécessité d'un changement ou une absence de capacité/volonté à réaliser un changement ? De plus, la fraîcheur étant liée aux aspects temporels de la donnée, nous comptons analyser la fraîcheur du réseau cyclable par le prisme de son évolution. Dans ce sens, les travaux de [Schmidl *et al.* 2021] montrent qu'il est possible d'analyser la fraîcheur d'un réseau en générant des itinéraires selon un algorithme de plus courts

chemins où les points de départ et d'arrivée de ces itinéraires sont obtenus grâce à une simulation de Monte Carlo. Cela permet d'apporter des éléments de réponse à la question de recherche 3.1 de l'Introduction. Le développement de méthodes d'analyse de l'évolution du réseau cyclable sont présentées dans les chapitres 8 et 9.

Afin de mener l'analyse de l'évolution du réseau cyclable, nous aurons besoin d'un outil représentant le réseau cyclable. Le chapitre 4 met en valeur le fait que le réseau cyclable peut être représenté par un graphe orienté pondéré. Dans le but de représenter les évolutions du réseau cyclable, nous proposons un graphe multiplexe dans le chapitre 8.

Deuxième partie

# Le réseau cyclable : définition et modélisation

Après avoir montré dans le chapitre 2 que le réseau cyclable n'était pas complètement défini, nous exprimons le besoin de proposer une définition claire de celui-ci, que ce soit au niveau des infrastructures routières le composant ou des différents usages de ce réseau par les cyclistes. C'est dans cette optique que le chapitre 5 présente notre définition du réseau cyclable accompagnée d'une explication des différents usages du cyclisme.

Une fois le réseau cyclable défini, nous présentons dans le chapitre 6 notre BDRM adaptée à l'usage du cyclisme d'un point de vue attributaire et généralisable à l'ensemble des usages d'un point de vue structurel. Cette BDRM contient une partie de son information à l'échelle de la voie de circulation au lieu du tronçon de route.

Le chapitre 7 est quand à lui dédié à l'instanciation de cette BDRM avec des données existantes. Une première phase concerne l'instanciation avec la BDTOPO® tandis qu'une deuxième phase consiste à reproduire ce processus avec les données d'OSM.

Chapitre 5

# Le réseau cyclable

**Sommaire**


**5.1 Définition du réseau cyclable . . . . . 69**
5.1.1 Infrastructures dédiées au cyclisme . . . . . 71
5.1.2 Infrastructures dédiées aux piétons . . . . . 75
5.1.3 Routes sans aménagement spécifique pour les cyclistes . . . . 76
5.1.4 Voies exclues du réseau cyclable . . . . . 77
**5.2 Des usagers avec des besoins différents . . . . . 78**
5.2.1 Les usages du vélo . . . . . 78
5.2.2 Adaptation à l'usager . . . . . 80
**5.3 Conclusion . . . . . 81**


Le chapitre 2 a montré que plusieurs définitions existent pour le réseau cyclable. De plus, des profils de cyclistes basés sur la notion de confiance en soi sont bien intégrés dans la littérature, or nous pensons qu'il faut apporter plus de nuances à ces propos. Il y a aussi beaucoup de critères que chaque usage du cyclisme va pondérer d'une manière différente. Ces différents critères pour différents usages représentent un travail préliminaire dans la réalisation d'une BDRM adaptée pour l'usage du cyclisme au niveau attributaire.

## 5.1 Définition du réseau cyclable

Nous définissons la partie routière du réseau cyclable comme l'ensemble des routes et chemins où les cyclistes sont tolérés. Cette définition, qui est large par rapport aux propositions de l'état de l'art [Arantxa 2000], utilise des infrastructures diversifiées que nous présentons dans cette section. Dans la suite de ce manuscrit, nous appelons le réseau cyclable $\mathcal{N}c$.

Les classes d'infrastructures cyclables présentées ici représentent la manière dont un cycliste perçoit une infrastructure. Chaque sous-section présente une famille d'infrastructures cyclables. Chaque famille d'infrastructures cyclables est composée d'une ou plusieurs classes d'infrastructures cyclables qui sont présentées dans des paragraphes à l'intérieur des sous-sections. Pour chaque classe d'infrastructures cyclables, sa représentation dans la BD TOPO® et OSM est fournie. L'ensemble des familles et classes d'infrastructures cyclables sont résumées dans le tableau 5.1.

Dans la suite de cette section, les différentes classes d'infrastructures sont présentées avec leur représentation dans la BD TOPO® et OSM. Une image illustre aussi

| Famille | Classe | Définition |
|---|---|---|
| Infrastructures dédiées au cyclisme | Piste cyclable | Routes dédiées aux cyclistes où la circulation automobile est interdite sauf rares exceptions |
| | Bande cyclable | Espace dédié aux cyclistes sur une route sans séparation physique avec la circulation automobile |
| | Double sens cyclable | Route à sens unique pour les voitures mais à double-sens pour les cyclistes |
| | Voie de bus partagée | Tronçon de route où les bus, les taxis et les cyclistes cohabitent. |
| | Chaussée à voie centrale banalisée (Chaussée à Voie Centrale Banalisée (CVCB)) | Tronçon de route composé de deux larges bandes cyclables et une voie de circulation automobile au milieu. La priorité est aux cyclistes. |
| | Vélorue | Tronçon de route accordant la priorité totale aux cyclistes. Le tronçon est souvent à sens unique pour les voitures avec le sens changeant à chaque intersection. |
| Infrastructures dédiées aux piétons | Voie piétonne | Route où les piétons sont prioritaires sur tous les autres usagers de la route. Un cycliste peut être contraint de descendre de son vélo. |
| | Escalier | Infrastructure piétonne particulière qui impose une grande contrainte de déplacement aux cyclistes. |
| | Zone de rencontre | Infrastructure partagée entre les piétons, les cyclistes et les voitures où les piétons ont la priorité. |
| Infrastructures dédiées aux voitures | Infrastructures dédiées aux voitures | Routes où les voitures sont prioritaires et où aucun aménagement n'existe pour les cyclistes. |
| Routes interdites | Routes interdites | Routes interdites aux cyclistes |

TABLE 5.1 – Classification des infrastructures du réseau cyclable

chacune de ces classes complétées par la représentation théorique dans ces BDRM de ces routes. Cette représentation illustre notre compréhension des spécifications de ces BDRM. Pour plus de détails sur les représentations, le chapitre 7 présente en détails les attributs importants à la compréhension de cette section. Il est aussi important de noter que lorsqu'une voie peut faire partie de plusieurs classes, la classe choisie est la première dans l'ordre de présentation de celles-ci dans le manuscrit.

### 5.1.1 Infrastructures dédiées au cyclisme

La famille d'infrastructures dédiées au cyclisme regroupe les classes d'infrastructures où les cyclistes sont, au minimum, tout autant prioritaires que les autres types d'usager. Nous appelons par la suite $\mathcal{N}ic$ la famille d'infrastructures dédiées au cyclisme.

**Pistes cyclables** Les pistes cyclables sont des aménagements dédiées à la circulation des cyclistes séparés de la circulation. Elles représentent les aménagements cyclables les plus sécurisés pour les cyclistes de par le fait que les véhicules motorisés n'ont pas le droit d'y accéder sauf un véhicule d'urgence en intervention. La figure 5.1 montre un exemple de piste cyclable. Cet exemple serait traduit dans la BDTOPO® par les attributs suivants : *NATURE = Route à 1 chaussée et CYCLABLE_G = Piste cyclable et SENS_CYC_G = Double sens*. Nous utilisons ce formalisme car nous pensons, au regard de ses spécifications [IGN 2021], que la séparation herbeuse entre la route et la piste cyclable n'est pas assez large pour que cette-dernière dispose de son propre tronçon. Il serait traduit dans OSM par les attributs suivants : *highway = cycleway et oneway :bicycle = no*. Un tronçon à part serait créé pour la route à droite de la piste cyclable contenant l'attribut *bicycle = use_sidepath*.



FIGURE 5.1 – Exemple de piste cyclable (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *highway = cycleway* et dans la BDTOPO® par *CYCLABLE_ G ou CYCLABLE_ D ou NAT_ RESTR= Piste cyclable.*

Nous appelons l'ensemble des pistes cyclables $\mathcal{N}pc$.

**Bandes cyclables** Les bandes cyclables sont des aménagements dédiées à la circulation des cyclistes sur des routes ouvertes à la circulation automobile. Ces aménagements ne sont pas onéreux et ne prennent que très peu de place donc ils sont très souvent utilisés en ville. Bien que ces aménagements séparent les flux de véhicules à moteurs des cyclistes, les bandes cyclables ne procurent pas la même sécurité qu'une piste cyclable du fait des dépassements (trop) rapprochés des véhicules à moteurs. La figure 5.2 montre un exemple de bande cyclable. Une représentation adaptée de la route sans les trottoirs dans la BD TOPO® est *NATURE = Route à 1 chaussée et CYCLABLE_ D = Bande cyclable et SENS_ CYC_ D = Sens direct et CYCLABLE_ G = Bande cyclable et SENS_ CYC_ G = Sens inverse.* La même représentation dans OSM est *highway = secondary et cycleway :both = lane.*



FIGURE 5.2 – Exemple de bande cyclable, le pont Jacques Gabriel à Blois (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *cycleway ou cycleway :both ou cycleway :right ou cycleway :left = {lane, opposite_ lane}* et dans la BDTOPO® par *CYCLABLE_ G ou CYCLABLE_ D = Bande cyclable* .

Nous appelons l'ensemble des bandes cyclables $\mathcal{N}bc$.

**Double-sens cyclable** Les double-sens cyclables sont des routes à sens unique pour les voitures mais où les cyclistes sont tolérés dans les deux sens de circulation sans espace clairement délimité à cet usage sur la chaussée. La figure 5.3 illustre ce type d'aménagement. La représentation dans la BD TOPO® de cette route est *NATURE = Route à 1 chaussée et NAT_ RESTR = Double sens cyclable non matérialisé.* La représentation dans OSM de cette route est *highway = secondary et oneway = yes et oneway :bicycle = no.*

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *oneway = yes et oneway :bicycle = no* et dans la BDTOPO® par *NAT_ RESTR = Double sens cyclable non matérialisé.*

Nous appelons l'ensemble des double-sens cyclables $\mathcal{N}dsc$.



FIGURE 5.3 – Exemple de double-sens cyclable (source Google Maps)

**Voies partagées avec les bus** Les voies partagées avec les bus sont des voies dédiées à la circulation des bus et des taxis où les cyclistes ont le droit de rouler. Ces voies, souvent très larges, sont une bonne alternative aux routes sans aménagements et peuvent procurer une plus grande sensation de sécurité que les bandes cyclables dans le cas de dépassements par des voitures. Cependant, les bus étant des véhicules longs, ils disposent d'angles morts importants qui provoquent des accidents souvent très graves. La figure 5.4 montre un exemple de voie de bus partagée avec les cyclistes. Cette route est représentée dans la BD TOPO® par les attributs *NATURE = Route à 1 chaussée*. L'attribut BUS n'est pas renseigné car il est utile uniquement lorsque l'ensemble des voies d'un tronçon sont réservées aux bus. Cette route est représentée dans OSM par les attributs *highway = primary et lanes = 4 et busway = lane et cycleway = share_busway et bus :lanes = yes/designated/designated/yes*.




FIGURE 5.4 – Exemple de voie de bus partagée, l'avenue de Grammont à Tours (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *cycleway = {shared_lane, opposite}* et dans la BD TOPO® par l'expression suivante : *NAT_RESTR = Piste cyclable et BUS != Sans objet*.

Nous appelons l'ensemble des voies partagées avec les bus $\mathcal{N}vpb$.

**Chaussée à voie centrale banalisée (CVCB)** Les CVCB sont des aménagements récents composés de trois voies avec deux très larges voies sur les côtés qui sont dédiées à la circulation des cyclistes et des voitures. Cependant, pour qu'une

voiture puisse doubler un cycliste, il faut qu'elle emprunte la voie du milieu qui est uniquement pour les voitures mais à double sens. Les cyclistes sont prioritaires sur les voitures sur cet aménagement. La représentation de cette route dans la BD TOPO® est *NATURE = Route à 1 chausséeé et NAT_RESTR = Chaussée à voie centrale banalisée*. Dans OSM, la route est représentée par les attributs *highway = secondary et oneway = no et lanes = 1 et cycleway = lane*.



FIGURE 5.5 – Exemple de CVCB, le pont du Maréchal Leclerc à Amboise (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *oneway = no et lanes = 1 et cycleway = lane* et dans la BDTOPO® par *NAT_RESTR = Chaussée à voie centrale banalisée*.

Nous appelons l'ensemble des CVCB $\mathcal{N}cvcb$.

**Vélorue** L'aménagement le plus récent concernant les voies partagées entre les voitures et les cyclistes est la vélorue où les cyclistes sont prioritaires et les voitures sont fortement contraintes avec une circulation en sens unique spécifiquement pour les véhicules à moteur et qui change régulièrement après une intersection. Les voitures n'ont pas le droit de doubler un cycliste et ceux-ci sont invités, via le marquage au sol, à rouler au milieu de la chaussée. La figure 5.6 montre une vélorue. La route illustrée sur cette image est représentée dans la BD TOPO® avec les attributs *NATURE = Route à 1 chaussée et NAT_RESTR = Vélorue*. Cette même route est représentée dans OSM avec les attributs *highway = residential et cyclestreet = yes*.




FIGURE 5.6 – Exemple de vélorue, la rue d'Entraigues à Tours (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *cyclestreet = yes* et dans la BD TOPO® par l'expression suivante : *NAT_RESTR = Vélorue*.

Nous appelons l'ensemble des vélorues $\mathcal{N}v$.

L'équation (5.1) présente la définition de la famille des infrastructures dédiées au cyclisme $N_{ic}$.

$$\mathcal{N}^{ic} = \mathcal{N}_{pc} \cup \mathcal{N}_{bc} \cup \mathcal{N}_{dsc} \cup \mathcal{N}_{vpb} \cup \mathcal{N}_{cvcb} \cup \mathcal{N}_{v} \tag{5.1}$$

### 5.1.2 Infrastructures dédiées aux piétons

La famille des infrastructures dédiées aux piétons regroupe l'ensemble des routes et chemins où les piétons sont prioritaires. Cette famille regroupe les zones de rencontre, les voies piétonnes et les escaliers. Nous appelons l'ensemble des infrastructures dédiées aux piétons $\mathcal{N}ip$.

**Zone de rencontre** Une zone de rencontre est un espace où les piétons sont les usagers prioritaires mais où les cyclistes et les voitures sont tolérés en respectant une vitesse limitée à 20km/h. La figure 5.7 montre un exemple de zone de rencontre. Cette route est représentée dans la BD TOPO® avec l'attribut *NATURE = Route à 1 chaussée*. Cette route est représentée dans OSM avec l'attribut *highway = living_street*.




FIGURE 5.7 – Exemple de zone de rencontre, la rue du Poids du Roi à Blois (source Google Maps)

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *highway = living_street* et n'est pas représentée dans la BD TOPO® .

L'ensemble des zones de rencontre est représenté par $Nzr$.

**Voies piétonnes** Les voies piétonnes sont des espaces réservés aux piétons où les véhicules motorisés sont interdits sauf dans de rares cas. Concernant les cyclistes, certaines routes tolèrent les cyclistes quand d'autres nécessitent de descendre de son vélo et de marcher à côté de celui-ci. Cette route est représentée dans la BD TOPO® par l'attribut *NATURE = Sentier* et dans OSM par *highway = path*.

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *highway = pedestrian, bridleway, footway, path, sidewalk, crossing* et dans la BDTOPO® par *NATURE = Sentier, Chemin*.




FIGURE 5.8 – Exemple de voie piétonne, les bords de Loire à Blois (source Google Maps)

L'ensemble des voies piétonnes est représenté par $\mathcal{N}vp$.

**Escaliers** Les escaliers, bien qu'étant une partie intégrante du réseau piéton, doivent être traités à part car ils représentent un obstacle beaucoup plus difficile à surmonter pour un cycliste. Il doit ici obligatoirement descendre de son vélo et soit, dans le meilleur des cas, le pousser dans la rampe ou la goulotte prévue à cet effet, soit porter son vélo dans les escaliers. Ces aménagements représentent donc une contrainte forte lors d'un itinéraire à vélo, cependant, ils peuvent représenter un réel gain de temps si le détour amené par le contournement d'un escalier est conséquent. Dans ce sens, les escaliers ne sont cependant pas exclus des outils de traçage d'itinéraires cyclables. Dans [Bres *et al.* 2022], un septième outil de traçage d'itinéraire (ViaMichelin) avait été utilisé avant de le laisser de côté car il était jugé trop écarté des réels besoins d'un cycliste. L'une de ces faiblesses est qu'il pouvait demander à un cycliste d'emprunter des escaliers de plus de 100 marches. La figure 5.9 montre un escalier problématique pour un cycliste. L'image est représentée dans la BD TOPO® par l'attribut *NATURE* = *Escalier* et dans OSM par *highway* = *steps*.

Cette classe d'infrastructure est représentée dans OSM par *highway* = *steps* et dans la BD TOPO® par l'expression suivante : *NATURE* = *Escalier*.

L'ensemble des escaliers est représenté par $\mathcal{N}_e$.

L'équation (5.2) présente la famille des infrastructures dédiées aux piétons.

$$\mathcal{N}^{ip} = \mathcal{N}_{zr} \cup \mathcal{N}_{vp} \cup \mathcal{N}_e \tag{5.2}$$

### 5.1.3 Routes sans aménagement spécifique pour les cyclistes

Les voies autorisées aux cyclistes sans aménagements représentent toute route dédiée aux véhicules à moteur où les cyclistes sont tolérés sur la chaussée mais sans voie partagée, ni aménagement cyclable. Dans OSM et dans la BD TOPO® , toute



FIGURE 5.9 – Exemple d'escalier, l'escalier Denis Papin de Blois (source Raphaël Bres)

route ne rentrant dans aucune des autres classes y compris les routes exclues de $\mathcal{N}_c$ est considérée. Nous appelons l'ensemble des routes sans aménagement spécifiques pour les cyclistes $\mathcal{N}_{sa}$

### 5.1.4 Voies exclues du réseau cyclable

Les routes interdites aux cyclistes concernent de manière générale les autoroutes et les voies à accès réglementé. Selon la législation du pays (par exemple l'Angleterre), les voies à accès réglementées peuvent autoriser les cyclistes mais cela reste rare. Ces voies ne font pas partie de $\mathcal{N}_c$ cependant, dans l'analyse par tronçons de routes, il est important de quantifier la proportion de routes qui a intégré ou quitté ce réseau en dehors des ajouts et des suppressions. La figure 5.10 montre une voie à accès réglementé et une autoroute. La première image est représentée dans la BD TOPO® par l'attribut *NATURE = Route à 1 chaussée* et dans OSM par *highway = trunk*. La seconde image est représentée dans la BD TOPO® par l'attribut *NATURE = Type autoroutier* et dans OSM par *highway = motorway*.

Dans OSM, les routes interdites sont représentées par *highway = {motorway, motorway_link, trunk, trunk_link} ou bicycle = no* et dans la BDTOPO® par *NATURE = Type autoroutier ou IMPORTANCE = 1*

Nous appelons l'ensemble des routes exclues du réseau cyclable $\mathcal{N}_{ex}$.

L'ensemble de ces classes et familles d'infrastructures nous permettent de donner notre définition de la partie routière du réseau cyclable dans l'équation (5.3).

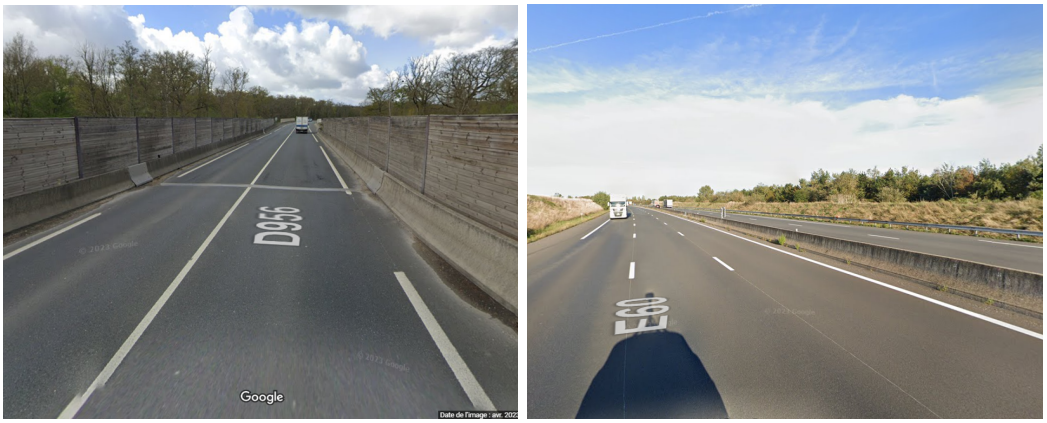



FIGURE 5.10 – Exemples de routes hors du réseau cyclable (source Google Maps)

$$\mathcal{N}_c = \mathcal{N}_{ic} \cup \mathcal{N}_{ip} \cup \mathcal{N}_{sa} \backslash \mathcal{N}_{ex} \tag{5.3}$$

Après avoir défini $\mathcal{N}c$ et ses infrastructures, nous avons besoin de comprendre qui sont les cyclistes utilisant ce réseau et quels sont leurs besoins. Pour cela, nous formalisons les usages et les besoins des cyclistes dans la prochaine section.

## 5.2 Des usagers avec des besoins différents

Le chapitre 2 a mis en valeur le fait que de nombreux usages du cyclisme existe. Dans cette section, nous définissons l'ensemble de ces usagers et leurs besoins en lien avec les critères de cyclabilité abordés dans le chapitre 2.

Comme expliqué dans la section précédente, les usages cyclistes sont nombreux et n'ont pas le même objectif. Par exemple, une famille souhaitant se promener ne va pas chercher à optimiser les mêmes critères qu'un livreur.

Le chapitre 2 a montré que cinq critères sont reconnus pour évaluer la cyclabilité : le confort, la sécurité, l'aspect direct, l'attractivité et la cohérence. Cependant, ces critères ont un poids différent en fonction de l'usage du vélo de chacun. Le tableau 5.2 présente l'importance de ces cinq critères de cyclabilité pour les cinq usages suivants : trajet domicile/travail, trajet utilitaire, livraison, déplacement récréatif, compétition. De plus, plusieurs caractéristiques de l'usager et de son vélo apportent une modification aux poids proposés. La première sous-section justifie les niveaux d'importance accordés à chaque critère en fonction de l'usager puis, la seconde sous-section justifie les ajustements proposés pour s'adapter aux caractéristiques de l'usager et de son vélo.

### 5.2.1 Les usages du vélo

Le chapitre 2 met en valeur de nombreux usages du cyclisme qui répondent à des besoins différents. Cette sous-section a pour but de présenter chaque usage et de

| | Critère | Sécurité | Confort | Directitude | Attractivité | Cohérence |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Usages | Domicile travail | *** | *** | ***** | **** | **** |
| | Déplacement utile | **** | *** | **** | *** | **** |
| | Livraison | ** | ** | ***** | | * |
| | Déplacement récréatif | *** | **** | * | ***** | *** |
| | Compétition | ** | ** | | **** | ** |
| Bonus et malus | | | | | | |
| Usagers | Jeune enfant | + | | - | + | + |
| | Personne âgée | + | + | | | |
| Sexe de l'usager | Femme | + | + | | | |
| | Homme | | | + | | |
| Type de vélo | Vélo cargo | - | | | | - |
| | VAE | | - | | | |

TABLE 5.2 – Importance des critères de cyclabilité en fonction de l'usage cycliste et des caractéristiques de l'usager (* : peu important ; ***** : très important ; + : bonus ; - : malus)

proposer une évaluation de l'importance des cinq critères de cyclabilité pour chaque usage. Les importances attribuées dans la partie *Usages* de la table 5.2 sont justifiées ici.

**Le vélo pour un déplacement domicile/travail (commuteurs)** Les déplacements entre le domicile et le travail représente le fait de se rendre sur son lieu de travail depuis son domicile à vélo et inversement. Ce trajet réalisé quotidiennement demande selon [Cole-Hunter *et al.* 2015] un environnement attrayant et un système de vélo en libre service. Cependant, le même article met en valeur le fait que la pente et la présence de transports publics réduisent la proportion de personnes réalisant un trajet domicile/travail. Ce dernier point est moins vrai depuis la crise de la COVID où beaucoup de personnes souhaitent éviter les transports publics comme le montre [Gutiérrez *et al.* 2020]. De plus, [Hunt & Abraham 2007] montrent que le caractère direct de l'itinéraire a aussi une importance dans le choix de celui-ci. [Banerjee *et al.* 2022] montrent que les commuteurs réalisent majoritairement moins de 4.5km pour se rendre à leur travail. Selon nous, ce fait rend la directitude le critère le plus important pour un commuteur.

**Le vélo pour un déplacement utilitaire** Le déplacement utilitaire représente un déplacement qui n'est pas régulier mais qui est tout de même utile au quotidien d'une personne comme pour aller au supermarché. Ces déplacements se doivent d'être rapides mais pas autant que pour une livraison ou un trajet domicile/travail.

Pour le reste, nous estimons qu'ils partagent beaucoup de points communs avec les commuteurs.

**Le vélo pour une livraison** Les livraisons étaient jusqu'à maintenance principalement assurées en voitures ou camion. Cependant, l'étroitesse de certaines villes rendaient difficile le déplacement de ces véhicules. Le vélo a récemment commencé à remplacer les camions de livraisons pour l'acheminement final de produits, même volumineux. Dans tous les cas, la livraison va toujours chercher l'itinéraire le plus rapide possible. L'attractivité est ici complètement laissée de côté tout comme la cohérence à un degré un peu moindre. La sécurité et le confort vont avoir un impact très modéré sur le choix de l'itinéraire dans le cadre de cet usage.

**Le vélo pour un déplacement récréatif** Le vélo pour un déplacement récréatif consiste en une sortie n'ayant pas de but utilitaire précis. Cet usage va généralement prioriser un itinéraire attractif avec des infrastructures confortables (peu de trafic routier). La sécurité est prise en compte mais est variable en fonction de la personne. La cohérence est aussi moins mise en valeur car ces déplacements récréatifs vont souvent se dérouler en zone rurale sur des routes à faible trafic routier.

**Le vélo en compétition** Le cyclisme en compétition demande un entraînement régulier qui se réalise souvent en extérieur. Cela amène les cyclistes à rechercher des routes leur offrant un bon compromis entre un entraînement stimulant et le fait de rester en sécurité. Cependant, ces cyclistes, a fortiori ceux roulant sur la route, vont avoir une vitesse de déplacement beaucoup plus élevée que celles des autres cyclistes, rendant leur utilisation de certaines infrastructures cyclables dangereuse. C'est pour cela que nous estimons que la cohérence du réseau cyclable pour cet usage est moyennement importante tout comme le confort car cet usager est expérimenté et n'a pas peur de circuler dans un flux de circulation automobile. La sécurité est aussi évaluée de la même manière. Ces cyclistes vont par contre privilégier de beaux paysages, amenant le critère d'attractivité à être élevé. La directitude, quand à elle, est clairement ignorée dans cet usage où la sortie est souvent prévue à l'avance par des usagers connaissant les routes qu'ils vont emprunter ou disposant d'outils de traçage d'itinéraires performants.

Ces différents usages du cyclisme mettent en exergue plusieurs visions du cyclisme actuellement répandues. Cependant, le spectre des usagers à l'intérieur même de ces usages est large et nécessite d'être adressé dans la sous-partie suivante.

### 5.2.2 Adaptation à l'usager

La quantification de certains critères dans une même situation peut aussi varier en fonction de caractéristiques de l'usager. Cette sous section présente d'abord une évolution des poids accordés aux critères de cyclabilité en fonction de caractéristiques physiques de l'usager mais aussi du type de vélo utilisé.

**Caractéristiques physiques** En effet, [Bixhaku *et al.* 2023] montrent que les femmes ont une perception de la sécurité qui est plus restrictive que celle des hommes. Aucune étude n'existe concernant les personnes transgenres selon nos connaissances. De plus, les jeunes cyclistes vont avoir tendance à plus rouler sur une route sans aménagements que des personnes plus âgées. Cela se confirme par les travaux de [Buehler & Pucher 2017] montrant que les personnes âgées mais aussi les enfants (non pris en compte dans [Bixhaku *et al.* 2023]) subissent plus d'accidents graves voir mortels que les autres. De plus, les enfants sont souvent accompagnés par leurs parents qui choisissent un itinéraire plus sécurisé. C'est pour cela que, lorsque l'usager est une femme ou qu'il a plus de 60 ans, nous ajoutons un point supplémentaire au critère de sécurité.

**Type de vélo** Un Vélo à Assistance Électrique (VAE) est aussi une solution d'amélioration du confort car il permet de moins se préoccuper de la pente présente sur le parcours. Les indicateurs liés à la pente rentrant dans le critère du confort, celui-ci est moins valorisé lorsqu'un VAE est utilisé. L'essor du vélo-cargo électrique permet de transporter des charges lourdes à vélo. Ces vélos étant volumineux, ils ne peuvent pas manoeuvrer sur les infrastructures cyclables les plus étroites et les escaliers, les amenant à circuler plus sur la route que les autres types de cyclistes. Cela amène une pénalité au critère de cohérence lorsque ce type de vélo est utilisé. La taille de ces vélos offre aussi une meilleure prise en compte de cet usage par les automobilistes, réduisant le besoin en sécurité de cet usage.

## 5.3 Conclusion

Nous avons défini le réseau cyclable $\mathcal{N}c$ comme l'ensemble des tronçons de route où un cycliste est toléré. Nous avons ensuite proposé une classification détaillée des aménagements routiers dans l'optique d'un usage cycliste. Nous avons ensuite utilisé les notions abordées dans le chapitre 2 pour proposer nos définitions des usages cyclistes et des différents usagers impactant l'importance que les critères de la cyclabilité prennent. Une limitation à ces travaux concernent le fait que lorsqu'un critère descend sous un seuil critique, une partie des usagers vont opter pour un report modal vers la voiture ou les transports publics au lieu de chercher une autre solution à vélo. Ce phénomène est difficilement quantifiable. Ces travaux permettent de réaliser une classification des aménagements selon le point de vue d'un cycliste et mettent en avant le fait que les cinq critères de cyclabilité sont pris en compte par les différents usages. Ces critères, dans le but de la création d'une BDRM adaptée au cyclisme, doivent essayer d'inclure des attributs qui leur sont associés.

Maintenant que $\mathcal{N}c$ est clairement défini, le prochain chapitre présente notre modélisation du réseau cyclable.

Chapitre 6

# Modèle conceptuel du réseau cyclable

**Sommaire**


**6.1 Présentation de la BDRM . . . . . 83**
6.1.1 Infrastructures routières . . . . . 83
6.1.2 Environnement des infrastructures routières . . . . . 87
6.1.3 Gestion de l'historique . . . . . 88
**6.2 Intérêts du modèle conceptuel proposé . . . . . 90**
**6.3 Conclusion . . . . . 92**


Ce chapitre décrit le modèle conceptuel de la BDRM que nous proposons. Ce modèle, bien que prévu pour le cyclisme, grâce à ses attributs permettant de calculer un ensemble d'indicateurs exhaustifs pour la cyclabilité, est adaptable à tout usager de la route. La première section de ce chapitre définit le modèle et ses notions clés quand la seconde illustre l'utilisation de celle-ci.

## 6.1 Présentation de la BDRM

Le modèle conceptuel que nous présentons a pour but d'être adapté à l'usage du cyclisme tout en offrant la possibilité d'inclure l'ensemble des usages de la route. La BDRM permettra une analyse la plus précise possible du réseau cyclable et devra pouvoir inclure l'ensemble des usages de la route dans sa structure. Le premier point a déjà été traité (cf chapitre 2) mais jamais le second. Cependant, notre cas d'étude nous oblige à traiter ces deux points conjointement. Pour résoudre ces deux problèmes, nous proposons et motivons une modélisation conceptuelle dans cette section. Nous présentons dans les prochaines sous-sections le fonctionnement global de la BDRM. Le détail complet de celle-ci attribut par attribut est disponible en annexe B. Nous présentons d'abord le contenu de la BDRM lié aux infrastructures routières, puis à l'environnement de ces infrastructures. Nous finissons par expliquer la gestion de l'historique.

### 6.1.1 Infrastructures routières

Cette sous-section présente la partie de la BDRM représentant l'infrastructure routière. Cela inclut notre représentation des routes, des itinéraires, des usagers

et des interactions des usagers sur les routes. La figure 6.1 présente une version complète de cette partie de la BDRM. Les blocs en jaune représentent les classes qui sont les modèles (e.g. la classe voie implique que toutes les voies créées dans notre BDRM auront un idVoie, un typeAménagement, ...) pour la création des objets (e.g. une voie particulière) de notre BDRM. Les blocs en vert représentent les relations entre les classes, et s'ils portent des attributs, nous construisons des classes d'association associées.

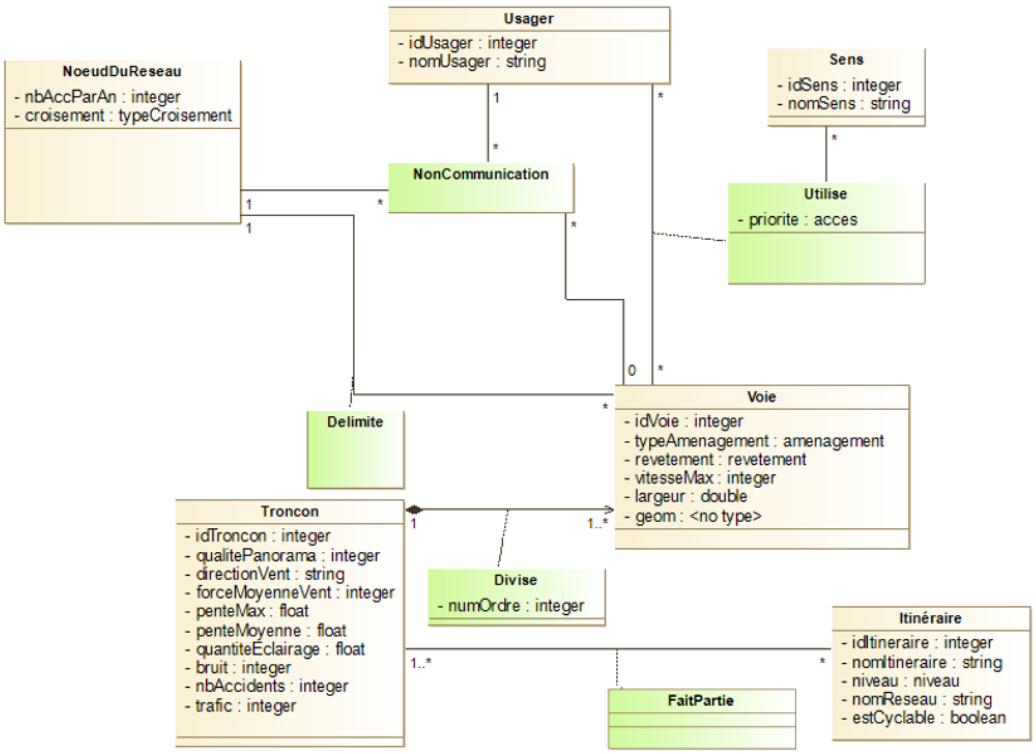



FIGURE 6.1 – Modèle conceptuel de la BDRM : partie concernant les infrastructures routières

Cette figure présente l'ensemble des classes et relations liées à l'infrastructure routière du monde réel.

**Voie** Une voie de circulation est un espace servant à la circulation d'un ou plusieurs usagers. La géométrie linéaire se trouve sur cet objet là où, dans les modèles des BDRM existantes, elle se trouve sur le tronçon de route. L'attribut *typeAmenagement* représente le type d'infrastructure routière. Il peut prendre comme valeur les différentes classes d'infrastructures cyclables présentées dans le chapitre 5. L'attribut *revetement* représente le type de revêtement au sol d'une voie de circulation. Il peut prendre comme valeur *Asphalte ou béton lisse*, *Béton bosselé*, *Pavés ou bois*, *Stabilisé*, *Terre*, *Herbe ou boue*, *Chemin rocailleux* ou *Sable*. L'attribut *vitesseMax* représente la vitesse maximale autorisée sur la voie. Lorsque plusieurs véhicules sont

tolérés sur une voie avec des limitations de vitesse différentes, la limite la plus élevée est retenue. Selon le code de la route français, cet attribut a pour valeur un nombre entier dans l'intervalle $]0, 130]$. La vitesse maximale autorisée peut être différente en fonction du sens de circulation sur un même tronçon donc nous plaçons cet attribut à l'échelle de la voie. L'attribut *largeur* représente la largeur de la voie de circulation. C'est un nombre réel positif arrondi au dixième de mètre. Pour les cyclistes, une voie plus large est un gage de sécurité car elle offre la possibilité de doubler d'autres cyclistes et d'être doublé avec un espace latéral suffisant par les véhicules à moteurs. Cette classe représente la nouveauté de notre modèle de BDRM car les données présentes à l'échelle du tronçon de routes dans les BDRM existantes seront stockées à l'échelle de la voie de circulation. Or, certains attributs des voies d'un même tronçon peuvent différer comme la largeur, la vitesse maximale autorisée ou les usages tolérés.

**Tronçon** Un tronçon (classe Troncon) de route représente un ensemble de voies ayant les mêmes points de départ et d'arrivée, étant parallèles et non séparées physiquement. Bien que la notion de voie soit centrale dans cette BDRM, il faut tout de même conserver la notion de tronçon de route pour certains attributs qui ne peuvent pas être réduits à l'échelle de la voie. Par exemple, le trafic routier d'un tronçon sur l'ensemble de ses voies va avoir un impact sur la sensation de confort d'un cycliste. Les attributs de la classe tronçon sont les suivants. L'attribut trafic représente le nombre de voitures par jour empruntant un tronçon. C'est un nombre entier positif ou nul. Nous choisissons de le mettre à l'échelle du tronçon car une bande cyclable peu utilisée peut se trouver sur une route à fort trafic automobile. L'attribut nbAccident compte le nombre d'accidents en un an sur un tronçon donné. C'est un nombre entier positif ou nul. Cet attribut est à l'échelle du tronçon car un accident peut concerner plusieurs voies de circulations. Hors si un accident concerne deux tronçons, alors il sera répercuté sur le nœud du réseau réalisant l'intersection entre ces deux tronçons. L'attribut bruit représente la quantité de bruit moyenne observée sur une voie de circulation. C'est un nombre entier positif. Le bruit n'est pas cantonné à une seule voie donc cet attribut est logiquement à l'échelle du tronçon. L'attribut quantitéEclairage consiste au ratio entre le nombre de lampadaires dans une zone de 2m autour du tronçon divisé par la longueur du tronçon en mètres. C'est un nombre réel positif ou nul. Nous émettons l'hypothèse qu'un lampadaire est assez puissant pour éclairer l'ensemble des voies d'un tronçon. L'attribut qualitéPanorama est une note de la beauté de la vue observée depuis un tronçon. C'est un nombre entier compris dans l'intervalle $[0, 10]$. Nous émettons l'hypothèse que le panorama est identique depuis l'ensemble des voies d'un tronçon. L'attribut penteMoyenne représente la moyenne de la pente pour chaque tronçon dans le sens de numérisation de celui-ci. C'est un nombre réel. l'attribut penteMaximale représente la pente maximale que peut atteindre un tronçon dans le sens de numérisation de celui-ci. C'est un nombre réel. Nous ajoutons cet attribut car une pente moyenne peut cacher des ruptures de pente amenant une inclinaison beaucoup plus forte que

la valeur de pente moyenne. L'attribut directionVent représente la direction depuis laquelle le vent a le plus de chances de venir. Les valeurs possibles sont N, NO, O, SO, S, SE, E et NE. L'attribut forceMoyenneVent représente la force moyenne (km/h) à laquelle souffle le vent sur un tronçon. C'est un nombre réel positif ou nul. Nous émettons l'hypothèse que la force du vent est identique sur l'ensemble des voies d'un tronçon.

**Divise** La relation *Divise* permet de représenter la manière dont un tronçon de route est divisé en voies de circulation. Cette relation contient un attribut qui est un numéro d'ordre de la voie dans le tronçon. Ce numéro est attribué en comptant l'ensemble des voies de circulation de gauche à droite dans le sens de numérisation de la voie.

La figure 6.2 sert de support à la compréhension des trois classes expliquées précédemment. Cette figure montre trois tronçons décomposés en respectivement 1, 4 et 1 voies. Cela implique donc la création de 6 géométries linéaires. Les deux tronçons composés d'une voie de circulation sont les deux trottoirs (en bleu). Ils sont séparés physiquement du troisième tronçon qui est la route. Ce troisième tronçon est composé de 4 voies avec 2 voies de circulation automobiles (en rouge) et 2 bandes cyclables (en vert).

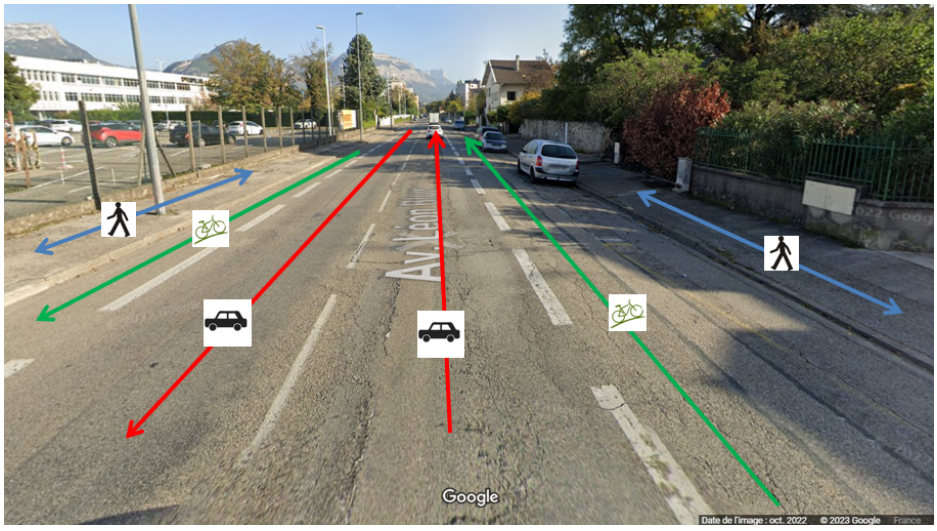



FIGURE 6.2 – Exemple de fonctionnement de la BDRM pour les tronçons et les voies

**Itinéraire** Un itinéraire est un ensemble de tronçons permettant de relier une origine et une destination parfois très éloignées. Cette classe est prévue pour différencier les itinéraires cyclables (exemple : La Loire à Vélo) d'itinéraires non cyclables (exemple : sentier de Grande Randonnée GR). Cette classe est intégrée car les routes empruntées par les itinéraires cyclables peuvent être ouvertes à la circulation mais sont prévues pour accueillir des cyclistes dans de bonnes conditions de sécurité et

de confort. Ces itinéraires empruntent des infrastructures dédiées aux cyclistes ou des routes à faible trafic motorisé.

**Fait partie** Cette relation permet de représenter l'appartenance d'un tronçon de route à un itinéraire. Cela permet par la suite de considérer l'ensemble des voies de circulations du tronçon comme prévues pour accueillir un usage précis en grande quantité.

**Usager** Un usager est un type d'utilisateur du réseau disposant d'un moyen de transport particulier pour utiliser ce réseau. Les usagers pris en compte dans la BDRM sont les vélos, les voitures, les piétons, les poids lourds, les bus, les tramways, les engins de déplacement personnel motorisés (EDPM), les personnes à mobilité réduite et les trains.

**Sens** Le sens représente le sens de circulation emprunté par un usager du réseau sur une voie donnée. Le sens peut être direct ou inverse par rapport au sens de numérisation de la voie. Il est important de différencier les sens de circulation car la majorité des usagers ne peut emprunter une voie que dans un seul sens de circulation.

**Utilise** *Utilise* est l'association centrale de ce modèle. Elle fournit les priorités de circulation sur chaque voie, pour tout usager et dans chaque sens de circulation. La priorité d'un usager peut être adaptée, possible, possible uniquement aux ayant droits, interdite et physiquement impossible. La priorité adaptée pour un usager dans un sens de circulation d'une voie signifie que la voie est conçue pour la circulation de cet usage et qu'il est prioritaire sur tout autre moyen de locomotion. Ce sont les voies à recommander en priorité dans le cas de la réalisation d'un itinéraire.

### 6.1.2 Environnement des infrastructures routières

Cette sous-section regroupe l'ensemble des objets environnant des infrastructures routières de la BDRM qui représentent des intersections du réseau, des entraves à la circulation des cyclistes, des points d'intérêts ou des parkings pour les vélos. La figure 6.3 présente la partie du modèle de la BDRM consacrée à l'environnement des infrastructures routières.

**Objet ponctuel** La super-classe *ObjetPonctuel* contient la géométrie de l'ensemble des éléments ponctuel composant l'environnement des infrastructures routières.

**Nœud du réseau** Un nœud du réseau ( instance de la classe *NoeudDuReseau*) marque la délimitation des voies. Ils peuvent représenter une intersection du réseau de mobilités ou un changement d'au moins une propriété d'une voie.

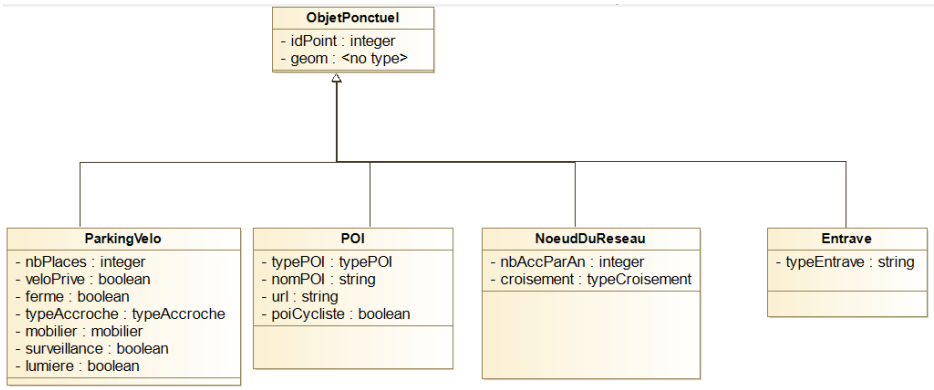



FIGURE 6.3 – Modèle conceptuel de la BDRM : partie concernant l'environnement des infrastructures routières

**Délimite** Cette relation indique les connexions entre les nœuds du réseau et les voies de circulation. Deux nœuds du réseau délimitent une voie dès lors qu'une intersection entre deux tronçons a lieu ou qu'au moins une voie membre du tronçon a un changement d'au moins une de ses propriétés.

**Non communication** La relation *NonCommunication* exprime le fait qu'un nœud du réseau reliant différentes voies ne permet pas la communication entre certaines de ces voies pour un ou plusieurs usages, car cela est physiquement impossible dans le monde réel. Ce concept est issu de la BD TOPO® .

**Point d'intérêt** Un point d'intérêt (instance de la classe POI) représente un lieu remarquable ou de service pour certains usagers. Cela peut être un commerce comme un parc. Dans OSM, les POI sont en majorité identifiés par le tag *amenity*. Un tronçon disposant de nombreux POI pour les cyclistes (fontaines, restaurants, magasin de réparation de vélos...) sera plus empruntée par les cyclistes.

**Parking vélo** Un lieu dans lequel les cyclistes peuvent ranger ou accrocher leur vélo. Cette classe est très variée car de simples arceaux pour accrocher un vélo et de grands parkings de plusieurs centaines de places sont présents.

**Entrave** Un obstacle à la circulation des cyclistes comme un croisement de rails, une barrière ou un plot. En effet, des rails de train ou de tramway, en fonction de leur orientation, peuvent coincer le pneu d'un vélo et causer un accident.

### 6.1.3 Gestion de l'historique

Après avoir expliqué le fonctionnement des tables principales de la BDRM, nous avons également besoin de référencer les différents changements réalisés lors de l'implémentation d'un nouveau jeu de données. Avec cette idée, cette sous-section explique le fonctionnement de la BDRM dans sa gestion de l'historique des données.

En effet, l'historique de l'ensemble des tables est géré par cette partie de la BDRM et cela inclut les ajouts d'objets, les suppressions d'objets et les modifications de valeurs d'attributs. La figure 6.4 contient les classes du modèle conceptuel de la BDRM permettant la gestion de l'historique des objets.

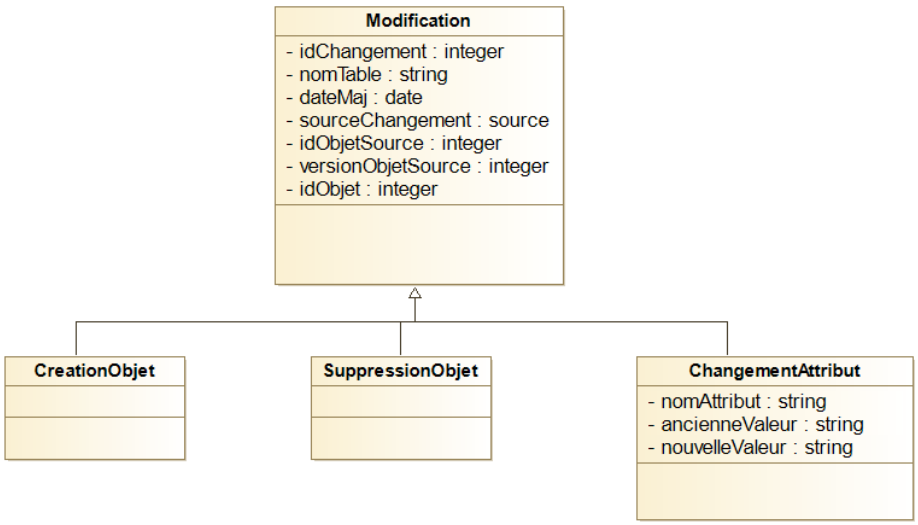



FIGURE 6.4 – Modèle conceptuel de la BDRM : partie concernant la gestion de l'historique

Sur cette figure, nous remarquons la présence de trois classes stockant les ajouts d'objet, les suppressions d'objet et les modifications d'attribut.

**Modification** Cette super-classe est commune à l'ensemble des classes gérant l'historique. Elle stocke les informations propres à l'objet concerné ainsi que ses liens avec la base de données où l'information a été extraite. Dans ce sens, le nom de la table où une modification a lieu est renseigné en tant qu'attribut.

**Ajout** Cette classe permet de suivre l'ensemble des objets ajoutés à la BDRM. Un tuple dans cette classe correspond à la création d'un seul objet.

**Suppression** Cette classe permet de suivre l'ensemble des objets supprimés de la BDRM. Un tuple dans cette classe correspond à la suppression d'un seul objet.

**Changement d'attribut** La classe ChangementAttribut permet de suivre l'ensemble des éditions d'attributs d'objets de la BDRM. Un tuple dans cette classe correspond à la modification d'un attribut. Un changement d'attribut apparaît lorsqu'un objet conserve son identifiant de départ mais a un de ses attributs qui est modifié. Nous comptons la géométrie comme un attribut. Si un objet de la base de données change s'identifiant, il est supprimé puis recréé avec le bon identifiant. La première valeur des attributs des objets créés n'est pas initialisée.

Avec ces différentes classes, nous venons d'expliquer le principe général de la BDRM. La section suivante donne des exemples d'utilisation de cette BDRM qui ne sont pas réalisables avec les sources de données existantes.

## 6.2 Intérêts du modèle conceptuel proposé

Dans cette section, nous fournissons des exemples d'utilisation de notre BDRM adaptée aux cyclistes qui ne sont pas possibles avec les bases de données actuelles. Nous commençons par expliquer comment notre BDRM prend en compte l'usage de manière plus précise. Nous continuons avec les multiples données liées à tous les aspects de la cyclabilité. Pour finir, nous évoquons comment le changement de granularité vers la voie de circulation simplifie la création de la BDRM.

**Meilleure prise en compte de l'usage** Le principal atout de la BDRM proposée dans la section précédente est sa capacité à intégrer tous les usages de la route. En effet, la relation *utilise* repose sur un triplet composé d'une voie, d'un sens de circulation et d'un usager puis donne la priorité de l'usager sur la voie et le sens de circulation. Cela permet d'éviter certains problèmes liés à des usagers qui doivent se limiter à certaines voies comme les camions sur les autoroutes qui ne peuvent pas emprunter la voie de gauche. Dans la même idée mais centrée sur le cyclisme, si une route composée de deux voies dispose d'une piste cyclable bidirectionnelle obligatoire, il est alors possible d'interdire les deux voies réservées aux véhicules motorisés aux cyclistes marquant ainsi la contrainte pour les cyclistes d'emprunter la piste cyclable.

**Intégration de la cyclabilité** Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, la cyclabilité est composée de plusieurs critères. Afin d'évaluer chacun de ces critères, les BDRM existantes ne disposent pas d'information suffisante à l'échelle attributaire. Avec notre modèle de BDRM, nous calculons une information attributaire beaucoup plus précise et adaptée à l'usage du cyclisme. Afin de montrer la prise en compte de l'usage cycliste par notre BDRM, nous présentons ici comment les 5 critères de cyclabilité de [Ahmed *et al.* 2024] sont intégrés. Le tableau 6.2 présente les différents attributs permettant d'établir des métriques de cyclabilité selon ces 5 critères.

D'abord, la directitude ne peut être mesurée que grâce à des comparaisons d'itinéraires entre différents modes de transports. Il est donc impossible de créer des attributs dédiés à ce critère en dehors d'une analyse des géométries.

Ensuite, la cohérence du réseau est illustrée par l'ensemble des voies de circulations adaptées au cyclisme. Si un itinéraire entre un point A et un point B utilise uniquement (au moins une majorité) de voies adaptées au cyclisme, alors nous pouvons conclure que l'itinéraire optimal cyclable est cohérent. Pour montrer qu'un réseau est cohérent, cette opération doit être répétée de nombreuses fois en modifiant les points de départ et d'arrivée pour tenir compte de l'ensemble de la zone d'étude du réseau cyclable.

TABLE 6.1 – Inclusion des critères de cyclabilité dans la BDRM

| Classe | Attribut | Sécurité | Confort | Directitude | Cohérence | Attractivité |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tronçon | qualitePanorama | | | | | X |
| Voie | revetement | | X | | | |
| Tronçon | forceMoyenneVent | X | X | | | |
| Tronçon | penteMoyenne | | X | | | |
| Entrave | | X | | | | |
| Voie | typeInfrastructure | | | | X | |
| Voie | geom | | | X | | |
| Voie | largeur | | X | | | |
| Voie | vitesseMax | X | X | | | |
| Tronçon | quantiteEclairage | X | | | | |
| Tronçon | bruit | | X | | | |
| Tronçon | trafic | X | X | | | |

Pour le confort, de nombreux attributs de la BDRM permettent d'estimer ce critère. A l'échelle de la voie de circulation il y a le revêtement, le trafic routier de celle-ci, la direction et la force moyenne du vent, la pente moyenne et maximale, le bruit, la quantité d'éclairage pour les tunnels et la circulation nocturne.

Pour la sécurité, le fait que les cyclistes soient écartés des véhicules motorisés est une première étape dans l'analyse de ce critère. La relation *utilise* permet de facilement réaliser cela une fois l'ensemble des usages instanciés dans la BDRM. Une deuxième étape consiste à analyser les attributs comptant le nombre d'accidents sur les tronçons et les intersections.

Pour l'attractivité, un attribut de la BDRM donnant une note au paysage est prévu mais il est difficile de savoir comment le peupler de manière objective. Le seul indicateur objectif est un nombre de POI renseignés car ils sont des points remarquables dans un petit rayon autour d'une voie. Cependant, l'exploitation d'un modèle d'apprentissage automatique supervisé sur les images caractérisant les zones pourrait aider à caractériser ce critère, mais nous n'en disposons pas.

**Tracé des géométries** Les géométries dans les BDRM existantes sont à l'échelle du tronçon de route. Cependant, notre BDRM propose une géométrie à l'échelle des voies. Cela permet de mieux représenter les déformations entre les différentes voies et stocker plus d'informations exclusives à chaque voie. La règle dans notre BDRM pour arrêter le tracé d'une géométrie linéaire est la même que celle pour une BDRM à l'échelle du tronçon. Cela signifie qu'il faut un changement attributaire sur au moins une voie d'un tronçon pour que l'ensemble des voies lui appartenant soient arrêtées et que l'on commence un nouveau tronçon. La figure 6.5 est une illustration servant par la suite à expliquer le fonctionnement de la BDRM.

Sur la route montrée par cette figure, la route passe d'une route à deux voies à deux routes ayant respectivement une et deux voies, chaque route représentant un sens de circulation. Après ce passage, la voie de dépassement passe à l'autre tronçon

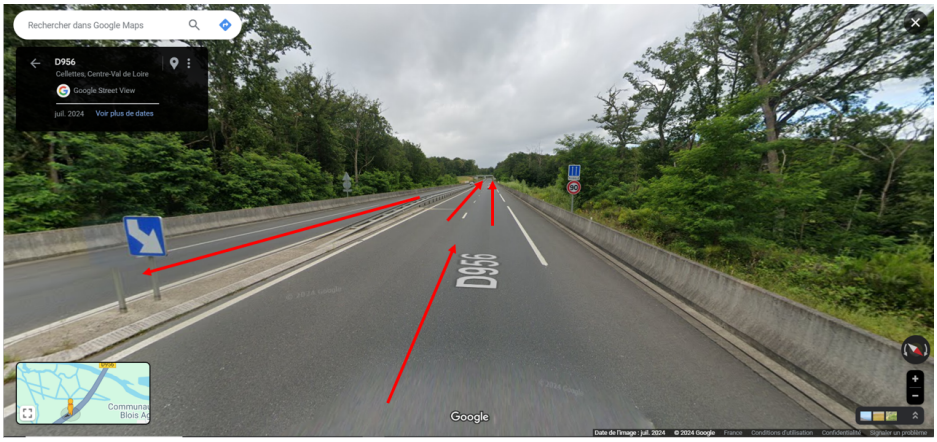



FIGURE 6.5 – Exemple de fonctionnement des géométries linéaires de la BDRM, source Google Maps

amenant les deux tronçons à avoir respectivement deux et une voies. Dans la BDRM, il y aura donc un premier tronçon représentant la première route à deux voies puis deux tronçons représentant les deux chaussées qui se créent. Au moment où la voie de dépassement change de sens de circulation, les deux tronçons précédents sont arrêtés afin d'en créer deux nouveaux avec le bon nombre de voies.

Cependant, cette manière de créer les voies en se basant sur les changements des tronçons s'oppose à une approche complètement centrée sur ces dernières. Cette approche consiste à ne pas considérer les tronçons de route lors de la création des géométries. Par exemple, si un tronçon dispose de trois voies et que l'une d'entre elles a un changement de limitation de vitesse, alors on créé deux géométries pour cette voie mais on en créé qu'une seule par voie pour les deux autres voies. Or, la BDRM demande que deux tronçons composés de trois voies soient créés amenant la création de deux géométries par voie.

Cet exemple est également adaptable lorsqu'une voie de stockage apparaît au milieu d'un tronçon pour tourner à gauche. Les deux voies de circulation ne sont pas modifiées lors de l'apparition et de la disparition de la voie de stockage mais uniquement à hauteur de l'intersection pour laquelle la voie de stockage a été créée. Par contre, cette approche principalement centrée sur les voies est beaucoup plus difficile à mettre en place avec les données existantes. C'est pour cela que nous avons choisi de créer des géométries de voies en conservant une logique par tronçons de route. Cette logique de tronçons de route est conservée pour une information qu'il n'est pas nécessaire de diviser à l'échelle de la voie comme le nombre d'accidents.

## 6.3 Conclusion

La BDRM que nous proposons dans ce chapitre dispose d'une classe principale à l'échelle de la voie de circulation qui permet de mieux inclure l'ensemble des usages que les BDRM existantes. De plus, nous avons proposés plusieurs attributs liés à

l'usage du cyclisme qui reste notre priorité dans ce manuscrit. Avec ces deux points centraux, notre BDRM nous permet de calculer des indicateurs de cyclabilité qui tiennent compte des cinq critères de cyclabilité de [Ahmed *et al.* 2024].

Cependant, le peuplement de cette BDRM soulève plusieurs interrogations. D'abord, existe-t-il une ou plusieurs BDRM permettant de la peupler ? Le chapitre 2 a mis en évidence de nombreux manques dans les BDRM cyclables. De plus, nous avons vu que les principales BDRM ont des attributs agrégés à l'échelle du tronçon de route, or la plus value proposée par notre BDRM est l'information qui doit être désagrégée à l'échelle de la voie.

Enfin, le modèle de notre BDRM n'est encore que théorique et une instance traduite en modèle logique doit être peuplée. Pour cela, le chapitre suivant présente le procédé d'instanciation avec la BDTOPO® puis avec OSM.

Chapitre 7

# Instanciation de la BDRM adaptée

## Sommaire


**7.1 Exemples fictifs illustratifs . . . . . 96**
7.1.1 Premier exemple, snapshot 1 . . . . . 97
7.1.2 Premier exemple, snapshot 2 . . . . . 98
7.1.3 Deuxième exemple . . . . . 100
**7.2 Peuplement à partir de la BDTOPO® . . . . . 105**
7.2.1 Règles d'nstanciation . . . . . 105
7.2.2 Illustration avec les exemples . . . . . 116
7.2.3 Données utilisées . . . . . 120
7.2.4 Résultats et discussion . . . . . 123
**7.3 Peuplement avec OSM . . . . . 124**
7.3.1 Règles d'instanciation . . . . . 124
7.3.2 Illustration avec les exemples . . . . . 129
7.3.3 Données utilisées . . . . . 130
7.3.4 Résultats et discussion . . . . . 131
**7.4 Comparaison des deux peuplements . . . . . 132**
7.4.1 Qualité des données . . . . . 132
7.4.2 Qualité du réseau cyclable . . . . . 133
7.4.3 Complémentarité des deux peuplements . . . . . 133
**7.5 Conclusion . . . . . 134**


Ce chapitre présente l'instanciation de notre base de données de réseau de mobilités (BDRM) adaptée pour les cyclistes. Ce chapitre vient répondre aux questions de recherche du problème $\mathcal{P}2$. Ici, nous montrons comment nous pouvons instancier une BDRM à l'échelle de la voie de circulation. Cette instanciation inclut une partie d'inférence sur certaines données où la valeur d'un attribut n'est pas directement donnée mais peut se calculer. Ensuite, nous illustrons les manques dans les BDRM existantes pour instancier un tel modèle. Nous allons instancier notre BDRM traduite en modèle logique avec la BDTOPO® et OSM. Dans le chapitre 2, nous avons vu que la BDTOPO® de l'IGN dispose de données routières précises mais avec un potentiel manque de fraîcheur à cause de campagnes de mises à jour périodiques qui ne sont pas synchronisées avec les changements sur le terrain.

La principale force de la BDTOPO® concerne sa capacité à donner des informations pour les voitures (attribut ACCES_VL) et les piétons (attribut ACCES_PED), mais l'information n'est pas systématiquement présente pour les autres usages. Néanmoins, cette BDRM a un modèle de données qui, dans ses évolutions récentes, prend de plus en plus en compte l'usage cycliste. Dans ce même chapitre, nous avons aussi évoqué OSM. Ses données ont une qualité hétérogène mais le modèle de cette BDRM lui offre l'avantage de pouvoir accueillir une information beaucoup plus riche que la BDTOPO®. Le fait que l'affectation d'attributs à un tronçon de route soit totalement ouverte permet de renseigner facilement des informations sur les usages secondaires de celui-ci. Pour les raisons développées ci-dessus, nous choisissons d'étudier l'instanciation de notre BDRM avec ces deux bases de données. Nous souhaitons d'abord étudier l'instanciation de la BDRM avec uniquement une base de donnée à la fois car cela permet d'éviter une phase d'appariement de la BDTOPO® et d'OSM qui contient des enjeux de recherche hors de portée de cette thèse.

Afin d'illustrer le fonctionnement de notre BDRM, nous utilisons deux exemples fictifs illustratifs qui ont été traduits en instances virtuelles de la BDTOPO® et d'OSM. A partir de ces instances, nous expliquons les transformations nécessaires pour peupler notre BDRM. Ces exemples sont introduits dans la section 7.1. La section 7.2 présente l'instanciation avec la BDTOPO® et la section 7.3 présente celle avec OSM. Pour finir, la section 7.4 compare les deux instanciations sous plusieurs points de vue. D'abord, d'un point de vue de la qualité des données, puis d'un point de vue de la qualité de la représentation du réseau cyclable. Pour finir, nous étudions la complémentarité de ces deux peuplements pour savoir si un appariement de la BDTOPO® et d'OSM serait pertinent pour améliorer le peuplement de notre BDRM.

Les deux peuplements ont été réalisés sur une base de données PostgreSQL. Les traitements par systèmes d'informations géographiques (Système d'Informations Géographiques (SIG)) requis à certaines étapes sont réalisés sur QGIS. Enfin, le logiciel de transformation de données utilisé est Talend Open Studio for Data Integration.

## 7.1 Exemples fictifs illustratifs

Cette section présente deux exemples fictifs illustratifs montrant comment certaines infrastructures, certaines relations et leurs évolutions sont représentées dans notre BDRM adaptée aux cyclistes. Le premier exemple concerne un cas simple d'une grande route disposant d'infrastructures cyclables diverses avec plusieurs intersections. Ce premier exemple a été réalisé à deux snapshots différents, qui sont ordonnés dans le temps dans le but d'illustrer le fonctionnement de la gestion de l'historique de la BDRM. Le second exemple représente un rond-point *à la hollandaise* où un premier rond-point très large est réservé aux cyclistes et aux piétons et un second rond-point, à l'intérieur du premier, est réservé aux véhicules à moteur.

Les sous-sections présentant les deux exemples sont structurées de la même manière. Une première partie explique en détails les infrastructures de ceux-ci. Puis la traduction de ces exemples est donnée, d'abord dans la BDTOPO® puis dans OSM.

Les exemples fonctionnent de la manière suivante. Les numéros présents sur les images représentent les identifiants des tronçons de route. Afin de faciliter la compréhension de ces exemples, les mêmes identifiants de tronçon sont utilisés dans la BDRM. Chaque couleur représente une voie avec un type d'infrastructure différent. Le noir pour les voies réservées aux voitures, le rouge pour les voies réservées aux piétons, le orange pour les zones de rencontre, le vert clair pour les bandes cyclables et le vert foncé pour les pistes cyclables. Les nœuds du réseau sont des cercles ou ovales bleus. Le sens de circulation est indiqué par les flèches présentes sur les voies. Si aucune flèche n'est présente sur une voie, cela signifie que celle-ci est à double sens.

### 7.1.1 Premier exemple, snapshot 1

L'image 7.1 représente un exemple assez simple incluant comme principales difficultés une voie de stockage et un double sens cyclable dans une rue à sens unique pour les voitures.

**Présentation du cas d'étude** La grande route formée par les tronçons 1, 2, 4, 5 et 7 peut par exemple correspondre à une route départementale en zone rurale avec quelques intersections où des routes mineures se connectent.

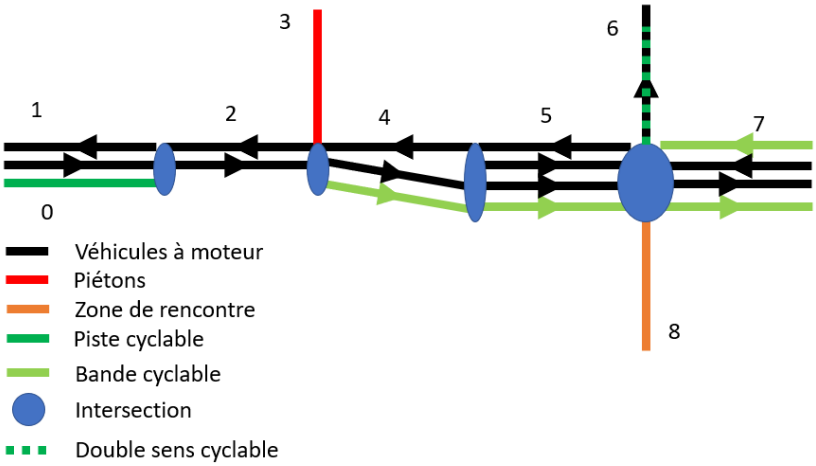



FIGURE 7.1 – Premier exemple de réseau routier pour l'implémentation dans la BDRM

Le tronçon 0 est une piste cyclable bidirectionnelle séparée physiquement du tronçon 1. Les tronçons 1 et 2 sont des routes à 2 voies de circulation. Le tronçon 3 est un chemin piétonnier étroit. Le tronçon 4 est une route à 2 voies disposant d'une

bande cyclable unidirectionnelle sur la droite. La voie du milieu n'est pas droite pour montrer quelle voie du tronçon 5 est le prolongement de celle-ci. Cependant, nous ne pouvons pas identifier quelle voie est le prolongement d'une autre entre deux tronçons consécutifs. Le tronçon 5 dispose d'une voie supplémentaire servant au stockage des véhicules voulant tourner à gauche à la prochaine intersection. Le tronçon 6 est une route à une voie de circulation à sens unique pour les voitures mais à double sens pour les cyclistes. Le double sens n'est pas matérialisé sur la chaussée. Le tronçon 7 est composé de deux voies de circulation pour les voitures et d'une bande cyclable unidirectionnelle de chaque côté. Le tronçon 8 est une zone de rencontre bidirectionnelle. Deux itinéraires cyclables sont présents dans cet exemple avec BicyBlois sur les tronçons 4, 5 et 7 et la Véloire sur les tronçons 6 et 8.

**Codage dans la BDTOPO®** L'image 7.1 regroupe 9 tronçons dont les principaux attributs dans la BDTOPO® sont regroupés dans le tableau 7.1.

Sur ce tableau, le tronçon avec l'identifiant 0 n'a pas de ligne dédiée car il est représenté dans la ligne du tronçon 1 par l'attribut CYCLABLE_D. En revanche, les bandes cyclables, qui sont représentées avec le même attribut ou son symétrique CYCLABLE_G, ne représentent pas un nouveau tronçon dans la BDTOPO® car elles ne sont pas séparées physiquement des voies pour les voitures.

**Codage dans OSM** Le tableau 7.2 représente la traduction dans OSM du réseau routier présenté dans l'image 7.1.

Dans ce tableau, la structure de données d'OSM représentant l'ensemble des usages est bien mise en avant avec par exemple le fait d'utiliser le tag *bicycle = use_sidepath* sur une route. Cela implique que cette route est interdite aux cyclistes mais qu'une piste cyclable parallèle est disponible pour cet usage.

### 7.1.2 Premier exemple, snapshot 2

Cet exemple est une version ultérieure de l'exemple 1. L'exemple présenté dans la sous-section précédente au temps $t$ et l'exemple de cette sous-section est au temps $t+1$. L'image 7.2 présente l'exemple 1, snapshot 2. Ce second snapshot servira à illustrer la gestion de l'historique dans notre BDRM plus tard dans ce chapitre.

Ce réseau comporte quelques différences par rapport au précédent. D'abord, la piste cyclable du tronçon 0 est supprimée pour la création d'une nouvelle piste cyclable 10 se trouvant à gauche de la route au lieu de la droite dans le snapshot précédent. Cette piste est prolongée par le tronçon 9 qui se trouve sur la gauche du tronçon 2. Dans ce cas, il s'agit d'une création d'infrastructure. Pour le tronçon 7, les deux bandes cyclables sont devenues des pistes cyclables unidirectionnelles. Le tronçon 8 a connu un changement dans sa géométrie. Dans ces exemples, nous avons volontairement représenté des déformations de la géométrie par rapport à la réalité sauf pour ce tronçon. Ceci est volontaire pour illustrer le changement géométrique.

Table 7.1 – Représentation de l'exemple 1, snapshot 1 dans la BDTOPO®

| Identifiant \ Attributs | NATURE | NB VOIES | LARGEUR | NAT RESTR | ACCES VL | SENS | CYCLABLE D | SENS CYC D | CYCLABLE G | SENS CYC G | ITI_CYCL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | Piste cyclable | Double sens | | | |
| 2 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | | | |
| 3 | Chemin | | 1 | | Physiquement impossible | | | | | | |
| 4 | Route à 1 chaussée | 2 | 7 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | | | BicyBlois |
| 5 | Route à 1 chaussée | 3 | 10 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | | | BicyBlois |
| 6 | Route à 1 chaussée | 1 | 3 | Double sens cyclable | Libre | Double sens | | | | | Véloire |
| 7 | Route à 1 chaussée | 2 | 7 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | Bande cyclable | Sens inverse | BicyBlois |
| 8 | Route à 1 chaussée | 1 | 2.5 | zone de rencontre | Libre | Double sens | | | | | Véloire |

Table 7.2 – Représentation de l'exemple 1, snapshot 1 dans OSM

| Identifiants \ Tags | highway | *cycleway*: *right* | *cycleway*: *left* | *cycleway*: *both* | one-way | *oneway*: *bicycle* | bicycle | surface | foot | lanes |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | cycleway | | | | | no | | asphalt | | |
| 1 | primary | | | | no | | use sidepath | asphalt | | 2 |
| 2 | primary | | | | no | | | asphalt | | 2 |
| 3 | path | | | | | | | compacted | designated | |
| 4 | primary | lane | | | no | | | asphalt | | 2 |
| 5 | primary | lane | | | no | | | asphalt | | 3 |
| 6 | tertiary | | | | yes | no | yes | asphalt | | 1 |
| 7 | primary | | | lane | no | | | asphalt | | 2 |
| 8 | living street | | | | no | no | designated | asphalt | designated | 1 |

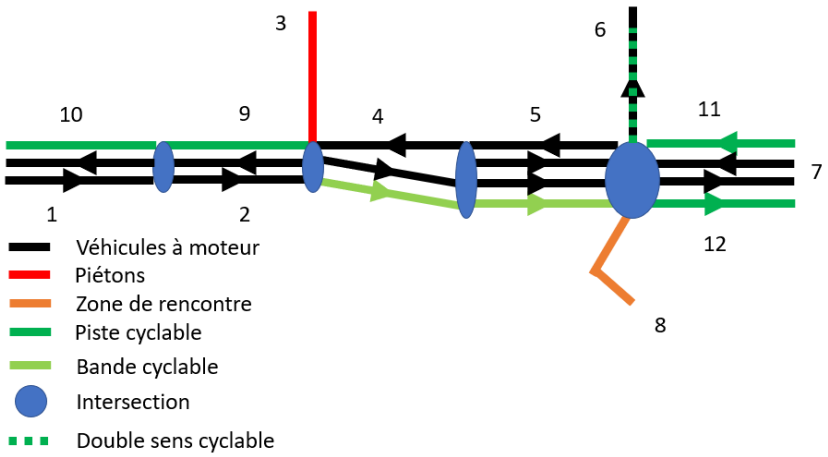



FIGURE 7.2 – Premier exemple de réseau routier pour l'implémentation dans la BDRM, deuxième snapshot

**Codage dans la BDTOPO®** Le tableau 7.3 liste les principaux attributs de chaque tronçon du deuxième snapshot de l'exemple 1 si ceux-ci formaient une partie de la BDTOPO®.

Parmi les changements notés dans le paragraphe précédent, le changement de géométrie n'est pas visible dans ce tableau. Pour les pistes cyclables parallèles aux tronçons 1 et 2, elles sont indiquées dans l'attribut CYCLABLE_G.

**Codage dans OSM** La création des nouvelles pistes cyclables parallèles aux tronçons 1 et 2 est visible dans ce tableau. Ces deux pistes cyclables doivent être des tronçons indépendants dans OSM là où elles sont collées à un tronçon de route dans la BDTOPO®. Les autres attributs restent identiques au temps $t$.

### 7.1.3 Deuxième exemple

Le deuxième exemple est un peu plus complexe en terme d'infrastructures routières. Il ne sera représenté que dans une version.

**Présentation du cas d'étude** L'image 7.3 est un deuxième exemple servant à l'instanciation de la BDRM. Elle représente un rond point pour les véhicules motorisés avec, autour de celui-ci, un rond point pour les piétons et les cyclistes. Ce genre d'aménagement est appelé un rond-point *à la hollandaise*. Différents types de routes sont aussi proposés aux différentes sorties du rond point.

Les tronçons 1 à 5 représentent un rond-point à deux voies de circulation pour les véhicules à moteur. Les tronçons 6, 7, 10 et 11 représentent une sortie d'un rond point où l'entrée et la sortie de celui-ci sont réalisés sur des tronçons séparés d'un terre-plein central. Pour les tronçons 10 et 11, il y a une voie de circulation par tronçon contre deux pour les tronçons 6 et 7. Les tronçons 8 et 9 représentent des

TABLE 7.3 – Représentation de l'exemple 1, snapshot 2 dans la BDTOPO®

| | NATURE | NB VOIES | LARGEUR | NAT RESTR | ACCES VL | SENS | CYCLABLE D | SENS CYC D | CYCLABLE G | SENS CYC G | ITI_CYCL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | Piste cyclable | Double sens | |
| 2 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | Piste cyclable | Double sens | |
| 3 | Chemin | | 1 | | Physiquement impossible | | | | | | |
| 4 | Route à 1 chaussée | 2 | 7 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | | | BicyBlois |
| 5 | Route à 1 chaussée | 3 | 10 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | | | BicyBlois |
| 6 | Route à 1 chaussée | 1 | 3 | Double sens cyclable | Libre | Double sens | | | | | Véloire |
| 7 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | Piste cyclable | Sens direct | Piste cyclable | Sens inverse | BicyBlois |
| 8 | Route à 1 chaussée | 1 | 2.5 | | Libre | Double sens | | | | | Véloire |

TABLE 7.4 – Représentation de l'exemple 1, snapshot 2 dans OSM

| Identifiants tronçons \ Tags | highway | *cycleway:right* | *cycleway:left* | *cycleway:both* | oneway | *oneway:bicycle* | bicycle | surface | foot | lanes | width |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | cycleway | | | | | no | | asphalt | | | |
| 1 | primary | | | | no | | use sidepath | asphalt | | 2 | 6 |
| 2 | primary | | | | no | | use sidepath | asphalt | | 2 | 6 |
| 3 | path | | | | | | | compacted | designated | | 1 |
| 4 | primary | lane | | | no | | | asphalt | | 2 | 7 |
| 5 | primary | lane | | | no | | | asphalt | | 3 | 10 |
| 6 | tertiary | | | | yes | no | yes | asphalt | | 1 | 3 |
| 7 | primary | | | lane | no | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 8 | living street | | | | no | no | designated | asphalt | designated | 1 | 2.5 |
| 9 | cycleway | | | | | no | | asphalt | | | |
| 11 | cycleway | | | | | yes | | asphalt | | | |
| 12 | cycleway | | | | | yes | | asphalt | | | |

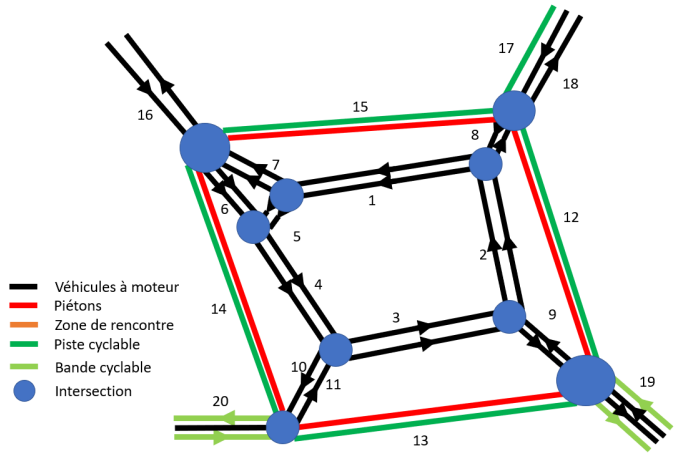



FIGURE 7.3 – Deuxième exemple de réseau routier pour l'implémentation dans la BDRM, le rond-point *à la hollandaise*

sorties du rond-point avec un tronçon par sortie. Les tronçons 12 à 15 représentent le rond-point pour les cyclistes et les piétons. Le tronçon 16 est une route à deux voies de circulation. Le tronçon 17 est une piste cyclable bordant le tronçon 18 qui est une route à deux voies de circulation. Le tronçon 19 est une route à deux voies de circulations disposant d'une bande cyclable unidirectionnelle de chaque côté de la chaussée. Le tronçon 20 est une CVCB (sous-section 5.1.1 du chapitre 5).

**Codage avec la BDTOPO®** Cette image regroupe 20 tronçons dont les principaux attributs dans la BDTOPO® sont regroupés dans le tableau 7.5.

Dans ce tableau, nous observons la présence du tronçon 17 dans l'attribut CYCLABLE_D du tronçon 18. Nous avons aussi la présence d'une CVCB qui est présentée comme un tronçon avec une voie de circulation pour les voitures et deux bandes cyclables. Pour les tronçons 12 à 15, le choix est de représenter uniquement la piste cyclable à partir d'exemples similaires trouvés dans la BDTOPO® mais nous savons que la voie pour les piétons collée à la piste cyclable n'est pas représentée.

**Codage avec OSM** Le tableau 7.6 représente la traduction dans OSM du réseau routier présenté dans l'image 7.3.

La principale originalité d'OSM dans cet exemple concerne l'utilisation du tag *segregated*. Ce tag fonctionne uniquement pour des tronçons mixtes entre les cyclistes et les piétons et indique que chaque usager dispose d'une voie délimitée par un marquage au sol. Le tag *foot = designated* représente aussi un indicateur de la présence des piétons sur la piste cyclable composée par les tronçons 12 à 15.

TABLE 7.5 – Représentation de l'exemple 2 dans la BDTOPO®

| Identifiant \ Attribut | NATURE | NB VOIES | LARGEUR | NAT RESTR | ACCES VL | SENS | CYCLABLE D | SENS CYC D | CYCLABLE G | SENS CYC G |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Rond-point | 2 | 5 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 2 | Rond-point | 2 | 5 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 3 | Rond-point | 2 | 5 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 4 | Rond-point | 2 | 5 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 5 | Rond-point | 2 | 5 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 6 | Route à 2 chaussées | 2 | 6 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 7 | Route à 2 chaussées | 2 | 6 | | Libre | Sens inverse | | | | |
| 8 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | | |
| 9 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | | |
| 10 | Route à 2 chaussées | 1 | 3 | | Libre | Sens direct | | | | |
| 11 | Route à 2 chaussées | 1 | 3 | | Libre | Sens inverse | | | | |
| 12 | Route à 1 chaussée | | | Piste cyclable | Physiquement impossible | | | | | |
| 13 | Route à 1 chaussée | | | Piste cyclable | Physiquement impossible | | | | | |
| 14 | Route à 1 chaussée | | | Piste cyclable | Physiquement impossible | | | | | |
| 15 | Route à 1 chaussée | | | Piste cyclable | Physiquement impossible | | | | | |
| 16 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | | | | |
| 18 | Route à 1 chaussée | 2 | 6 | | Libre | Double sens | Piste cyclable | Double sens | | |
| 19 | Route à 1 chaussée | 2 | 9 | | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | Bande cyclable | Sens inverse |
| 20 | Route à 1 chaussée | 1 | 6 | Chaussée à voie centrale banalisée | Libre | Double sens | Bande cyclable | Sens direct | Bande cyclable | Sens inverse |

TABLE 7.6 – Représentation de l'exemple 2 dans OSM

| Identifiants \ Tags | highway | segregated | *cycleway: both* | oneway | *oneway: bicycle* | bicycle | surface | foot | lanes | width |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 5 |
| 2 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 5 |
| 3 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 5 |
| 4 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 5 |
| 5 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 5 |
| 6 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 7 | primary | | | yes | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 8 | secondary | | | no | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 9 | tertiary | | | no | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 10 | secondary | | | yes | | | asphalt | | 1 | 3 |
| 11 | secondary | | | yes | | | asphalt | | 1 | 3 |
| 12 | cycleway | yes | | | no | | asphalt | designated | | |
| 13 | cycleway | yes | | | no | | asphalt | designated | | |
| 14 | cycleway | yes | | | no | | asphalt | designated | | |
| 15 | cycleway | yes | | | no | | asphalt | designated | | |
| 16 | secondary | | | no | | | asphalt | | 2 | 6 |
| 17 | cycleway | | | | no | | asphalt | | | |
| 18 | secondary | | | no | | use_sidepath | asphalt | | 2 | 6 |
| 19 | secondary | | lane | no | | | asphalt | | 2 | 9 |
| 20 | residential | | lane | no | no | | asphalt | | 1 | 6 |

## 7.2 Peuplement à partir de la BDTOPO®

Dans cette section, nous cherchons à savoir si la BDTOPO® permet d'instancier notre BDRM adaptée à l'usage du cyclisme. Le chapitre 2 a mis en valeur certains problèmes de qualité dans ces données qui pourraient compromettre cette instanciation. Or, les exemples proposés dans la section précédente disposent de données avec une qualité suffisante pour démontrer si une instanciation est possible ou non. Les représentations que nous proposons ne tiennent pas compte des possibles incomplétudes des bases de données servant au peuplement. Cette section explique les mécanismes de peuplement de notre BDRM adaptée au cyclisme à partir de la BDTOPO®. Nous commençons par détailler les données utilisées pour instancier le modèle avant d'expliquer les détails de ce peuplement. Nous illustrons ce peuplement avec les exemples présentés dans la section précédente avant de présenter des indicateurs concernant les données obtenues.

### 7.2.1 Règles d'nstanciation

L'instanciation de notre BDRM avec la BDTOPO® est obtenue après plusieurs traitements des tables que nous avons à disposition. Nous commençons par extraire les tronçons, puis nous calculons le nombre de voies pour chaque tronçon et nous terminons en calculant les différents attributs de chaque classe. Nous détaillons dans cette sous-section l'ensemble de ces étapes.

**Classe *Troncon* (idTroncon, qualitePanorama, directionVent, forceMoyenneVent, penteMax, penteMoyenne, quantiteEclairage, bruit, nbAccidents, trafic)** Pour chaque entité de la couche TRONCON_DE_ROUTE de la BDTOPO® nous créons une entité de la classe Troncon. En plus de cela, certains aménagements cyclables se trouvant sur le côté de ces objets doivent aussi avoir un tronçon dédié dans notre BDRM.

Cela concerne les entités de la BDTOPO® ayant comme attribut $CYCLABLE_D$ ou $CYCLABLE_G$ de valeur appartenant à {Piste cyclable, Aménagement mixte hors voie verte}. Ces infrastructures peuvent représenter une nouvelle voie (une bande cyclable) ou un nouveau tronçon (une piste cyclable). Pour déterminer les nouveaux tronçons à créer à partir d'un tronçon $t_{BDTOPO}$ de la BDTOPO®, nous appliquons la règle *creatG* (algorithme 7.1) pour les cas à gauche. La démarche est la même pour ceux à droite. Cette règle affecte aussi un nombre de voies qui correspond au nombre de sens autorisés sur l'aménagement créé. Dans cet algorithme et les suivants, la fonction $peuplerTroncon(o)$ crée une instance de Troncon à partir du tronçon $o$ issu de la BDTOPO®, et la fonction $peuplerVoie(n, t)$ crée $n$ instances de voies qui seront liées par la relation *FaitPartie* au tronçon $t$.

Mis à part l'$idTroncon$ (autoincrémenté), aucun des attributs de la classe *tronçon* ne peut être peuplé à l'aide des données disponibles pour les entités de la couche TRONCON_DE_ROUTE de la BDTOPO®. Les pentes moyenne et maximale

**Algorithme 7.1** Règle *creatG* de création d'un tronçon et de leurs voies pour une infrastructure à gauche ou à droite de la chaussée

1: $t_{BDTOPO}$: un tronçon de la BDTOPO®
2: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_G \in$ {"piste cyclable", "amenagement mixte hors voie verte"} **alors**
3: $t = peuplerTroncon(t_{BDTOPO})$
4: **si** $t_{BDTOPO}.SENS_CYC_G ==$ "Double sens" **alors**
5: $peuplerVoie(2, t)$
6: **sinon**
7: $peuplerVoie(1, t)$
8: **fin si**
9: **fin si**

pourraient être peuplées grâce aux géométries en 3 dimensions de la BDTOPO® mais cela ne concerne que la moitié des tronçons et de nombreuses incohérences ont été retrouvées dans les données par exemple, des pentes à plus de 30% sur des grandes routes.

**Classe *Voie* (idVoie, typeAmenagement, revetement, vitesseMax, largeur, geom)** La BDTOPO® n'ayant pas de classe à l'échelle de la voie, nous devons retrouver toutes les informations concernant celles-ci à l'échelle du tronçon.

Le nombre de voies fourni par la BDTOPO® dans l'attribut $NB_VOIES$ concerne uniquement celles pour l'usage principal du tronçon (90% du temps la voiture). Pour les autres modes de transport (piéton, vélo), il n'est pas indiqué mais il est possible de l'estimer dans certaines situations.

Pour les tronçons que nous avons créé précédemment à partir des attributs $CYCLABLE_D$ et $CYCLABLE_G$, nous n'avons pas d'information sur leur nombre de voies. Nous supposons qu'il s'agit d'une seule voie lorsqu'un seul sens de circulation cycliste est possible et 2 voies quand le sens de circulation cycliste est double.

Sur les tronçons existants au départ dans la BDTOPO®, lorsque l'attribut $NB_VOIES$ est supérieur ou égal à 1, le nombre de voies est renseigné tel-quel.

Lorsque le nombre de voies n'est pas renseigné ou égal à 0, une seule voie de circulation est créée dans la BDRM. Pour les voies ayant 0 voies dans la BDTOPO®, ce choix est justifié par ce passage issu des spécifications : Nombre de voies = 0, Valeur d'attribut réservée aux tronçons de route de $Nature = \{Type\ autoroutier, Bretelle, Route\ \ 2\ chausses, Route\ \ 1\ chausse, Rond-point\}$ pour lesquels le nombre de voies est inconnu, ainsi qu'à tous les tronçons fictifs. Pour les voies n'ayant pas de nombre de voies renseignées, la justification est liée à ce passage des spécifications : Valeur d'attribut réservée aux tronçons de route de $Nature = \{Route\ empierre, Chemin, Escalier, Sentier\}$.

Pour l'ensemble des tronçons créés à partir des tronçons existants de la BDTOPO®, si l'attribut $CYCLABLE_D$ ou $CYCLABLE_G$ a pour valeur

*bande cyclable*, alors nous accordons une ou deux voies supplémentaires en fonction du sens de circulation (deux voies si le sens est double, une autrement) par bande cyclable au tronçon concerné. Prenons l'exemple d'un tronçon à 2 voies pour les véhicules à moteurs avec l'attribut $CYCLABLE_D$ valant *bande cyclable* dans le sens direct et $CYCLABLE_G$ valant *bande cyclable* à double sens. Le nombre de voies sera augmenté de 1 grâce à $CYCLABLE_D$ et de 2 grâce à $CYCLABLE_G$, résultant dans un tronçon à 5 voies.

La règle *creatC* présentée dans l'algorithme 7.2 illustre les principes du peuplement, à partir d'un tronçon de la BDTOPO®, de notre BDRM sur les voies et les tronçons.

Une fois que chaque tronçon dispose du bon nombre de voies, nous pouvons calculer les attributs de chacune des voies.

La BDTOPO® ne fournit qu'une estimation de la vitesse moyenne sur chaque tronçon en utilisant plusieurs attributs. Afin d'obtenir une limitation de vitesse cohérente, nous avons augmenté cette vitesse moyenne en la remplaçant par la limitation de vitesse immédiatement supérieure utilisée dans le code de la route français. Cet attribut n'est renseigné que lorsque l'attribut de la BDTOPO® l'est également (cf. algorithme 7.3). Les pistes cyclables créée à partir des attributs $CYCLABLE_D$ et $CYCLABLE_G$ ne peuvent pas être traitées car nous ne disposons d'aucune information dans la BDTOPO® à ce sujet.

Dans cet algorithme et les suivants, nous utilisons les fonctions suivantes. La fonction $obtenirTroncon(t_{BDTOPO}, c)$ renvoie le tronçon principal de la classe *Troncon* associé au tronçon $t_{BDTOPO}$ de la BDTOPO®. Le paramètre $c$ peut prendre trois valeurs qui sont C, D et G. Dans le premier cas, le tronçon principal de l'objet de la BDTOPO est renvoyé. Dans les deux autres, ce sont les tronçons créés à droite ou à gauche du tronçon principal qui sont renvoyés. La fonction $voiesTroncon(t)$ renvoie les instances de la classe *Voie* associées dans *FaitPartie* à $t$ qui est un tronçon de la classe *Troncon*.

Concernant la largeur de chaque voie de circulation, nous ne disposons que de l'information à l'échelle du tronçon de route sans idée de la répartition. Le parti pris est de donner **un mètre** aux bandes cyclables car nous estimons cette largeur comme un compromis entre la norme (1.5m) et la réalité. En retirant les largeurs des bandes cyclables, il reste la largeur de la route dédiée aux voies pour les véhicules à moteur, et alors nous divisons la largeur par le nombre de voies. Il faut aussi tenir compte que cet attribut n'est pas aussi bien rempli que dans les exemples fictifs présentés précédemment. Cet attribut n'est rempli que lorsque l'attribut correspondant de la BDTOPO® l'est également. L'algorithme 7.4 synthétise ces règles. Comme cette largeur de 1m (ou 1,5m) est une largeur par défaut, dans l'algorithme nous utilisons une constante $larg\mathcal{N}bc$ qui pourrait être redéfinie si besoin.

Le principal problème pour la largeur concerne les tronçons créés à partir des pistes cyclables et des attributs se trouvant dans la BDTOPO® dans les attributs $CYCLABLE_D$ et $CYCLABLE_G$. En effet, pour ces tronçons, nous ne connaissons que leur type d'infrastructure et le sens de circulation sur le tronçon.

Pour la géométrie, nous choisissons de conserver la géométrie du tronçon pour

**Algorithme 7.2** Règle creatC pour la création des tronçons centraux et de leurs voies

1: $t_{BDTOPO}$: un tronçon de la BDTOPO®
2: $t = peuplerTroncon(t_{BDTOPO})$
3: **si** $t_{BDTOPO}.NB_VOIES == 0$ *ou null* **alors**
4: $peuplerVoie(1, t)$
5: **sinon**
6: $peuplerVoie(t_{BDTOPO}.NB_VOIES, t)$
7: **fin si**
8: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_D ==$ "*Bande cyclable*" **alors** ▷ Bloc pour les bandes cyclables à droite
9: **si** $t_{BDTOPO}.SENS_CYC_D ==$ "*Double sens*" **alors**
10: $peuplerVoie(2, t)$
11: **sinon**
12: $peuplerVoie(1, t)$
13: **fin si**
14: **fin si**
15: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_G ==$ "*Bande cyclable*" **alors** ▷ Bloc pour les bandes cyclables à gauche
16: **si** $t_{BDTOPO}.SENS_CYC_D ==$ "*Double sens*" **alors**
17: $peuplerVoie(2, t)$
18: **sinon**
19: $peuplerVoie(1, t)$
20: **fin si**
21: **fin si**
22: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_D ==$ "*Goulotte ou rampe*" **alors** ▷ Bloc pour les goulottes ou rampes à droite
23: $peuplerVoie(1, t)$
24: **fin si**
25: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_G ==$ "*Goulotte ou rampe*" **alors** ▷ Bloc pour les goulottes ou rampes à gauche
26: $peuplerVoie(1, t)$
27: **fin si**

**Algorithme 7.3** Règle *popVoieVitesse* pour le peuplement de l'attribut *VitesseMax* de la classe *voie*

1: $t_{BDTOPO}$: un tronçon de la BDTOPO®
2: $t = obtenirTroncon(t_{BDTOPO}, c)$
3: $listeV = voiesTroncon(t)$
4: **si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 110 **alors**
5: $vmax = 130$
6: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 90 **alors**
7: $vmax = 110$
8: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 80 **alors**
9: $vmax = 90$
10: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 70 **alors**
11: $vmax = 80$
12: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 50 **alors**
13: $vmax = 70$
14: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 30 **alors**
15: $vmax = 50$
16: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 20 **alors**
17: $vmax = 30$
18: **sinon si** t_BDTOPO.VIT_MOY_VL $>$ 10 **alors**
19: $vmax = 20$
20: **sinon**
21: $vmax = 10$
22: **fin si**
23: **pour tout** $v \in listeV$ **faire**
24: $v.vitesseMax = vmax$
25: **fin pour**

**Algorithme 7.4** Règle *popVoieLargeur* pour le peuplement de l'attribut *largeur* des instances de la classe *voie*

1: $largNbc = 1$ ▷ largeur bande cyclable par défaut
2: $t_{BDTOPO}$: un tronçon de la BDTOPO®
3: $t = obtenirTroncon(t_{BDTOPO}, c)$
4: $listeV = voiesTroncon(t)$
5: $nbVoies = \sharp(listeV)$
6: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_D ==$ "*Bande cyclable*" **alors**
7: $listeV[1].largeur = largNbc$
8: $t_{BDTOPO}.LARGEUR = t_{BDTOPO}.LARGEUR - largNbc$
9: **si** $t_{BDTOPO}.SENS_CYC_D ==$ "*Double sens*" **alors**
10: $listeV[2].largeur = largNbc$
11: $t_{BDTOPO}.LARGEUR = t_{BDTOPO}.LARGEUR - largNbc$
12: **fin si**
13: **fin si**
14: **si** $t_{BDTOPO}.CYCLABLE_G ==$ "*Bande cyclable*" **alors**
15: $listeV[\sharp listeV].largeur = largNbc$
16: $t_{BDTOPO}.LARGEUR = t_{BDTOPO}.LARGEUR - largNbc$
17: **si** $t_{BDTOPO}.SENS_CYC_G ==$ "*Double sens*" **alors**
18: $listeV[\sharp listeV - 1].largeur = largNbc$
19: $t_{BDTOPO}.LARGEUR = t_{BDTOPO}.LARGEUR - largNbc$
20: **fin si**
21: **fin si**
22: **pour tout** $v \in listeV$ **faire**
23: **si** $v.largeur == null$ **alors** ▷ On cherche seulement les voies qui n'ont pas encore une largeur
24: $v.largeur = t_{BDTOPO}.LARGEUR$ / $nbVoies$
25: **fin si**
26: **fin pour**

chaque voie étant donné les problèmes de complétude concernant la largeur. Ce sujet sera évoqué en perspectives de ce manuscrit.

**Association *Utilise* (idvoie, idusager, idsens, priorite)** Pour l'association *Utilise*, nous devons déterminer le régime de priorité pour chaque triplet voie, usager, sens de circulation. Nous commençons par peupler cette association en utilisant le produit carthésien entre l'ensemble des voies, des usagers et des sens de circulations. Or dans cette sous-section nous n'utilisons qu'un seul usager : le vélo.

Le sens de circulation est une information qui a été calculée dans le cas d'un tronçon de la BDTOPO® à double-sens disposant d'au moins deux voies pour les véhicules motorisés. Dans le cadre d'un nombre de voies pair, le même nombre de voies est alloué à chaque sens de circulation (séparation en deux parties égales du nombre de voies). Ce point est un problème dans le cadre d'un tronçon disposant par exemple de deux voies de bus à droite puis deux voies pour voitures à gauche. Cependant, il est difficile d'identifier ces cas à l'aide de la BDTOPO®.

Dans le cadre d'un tronçon de la BDTOPO® ayant un nombre de voies impair et supérieur ou égal à 3, la voie centrale est indiquée comme vide car nous ne connaissons pas son sens de circulation. Les autres voies sont indiquées soit dans le sens direct soit dans le sens inverse. Imaginons cette fois un tronçon avec deux voies de bus à droite puis trois voies pour les voitures à gauche, notre peuplement serait inexact. La table *utilise* dans la BDRM contient l'ensemble des triplets voie, usager, sens de circulation pour lesquels la priorité de chaque usager (adapté, toléré, interdit, impossible) est connue ou calculable à partir des attributs de la BDTOPO®. Par exemple, les lignes indiquant qu'il est interdit de prendre une voie à contre-sens sont toutes présentes. De plus, la BDTOPO® ne permet pas de retrouver une route interdite aux cyclistes à cause d'une piste cyclable obligatoire parallèle à la route.

Dans ce contexte, nous avons mis en place deux algorithmes pour retrouver et affecter autant que possible le sens aux voies de circulation. Pour cela, nous utilisons une table intermédiaire nommée *SensVoie* contenant l'identifiant de la voie et son sens de circulation. La règle *popUtiliseSens* (algorithme 7.5) permet de peupler, pour chaque couple voie, sens de circulation associé à l'usage cycliste qui sera stockée dans la table *SensVoie*. La fonction $peuplerSensVoie(v, s)$ crée une instance de *SensVoie* à partir d'une voie et d'un sens. La fonction $obtenirPisteTroncon(t_{BDTOPO}, c)$ renvoie le tronçon concernant la piste cyclable de la classe *Troncon* associé au tronçon $t_{BDTOPO}$ de la BDTOPO® du côté $c$ (gauche ("$SENS_CYC_G$") ou droite ("$SENS_CYC_D$")). Si le peuplement de *Troncon* pour $t_{BDTOPO}$ n'a pas donné lieu à créer un tronçon pour une piste à gauche ou droite, la fonction renvoie *null*.

Toute relation sens/usager/voie n'étant pas présente dans la classe intermédiaire *SensVoie*, signifie que l'usage par le type d'usager de la voie dans le sens en question est interdit. Aussi, dans ces cas, les instances de l'association Utilise doivent avoir pour l'attribut priorité la valeur "interdit". Après cela, il faut savoir si l'aménagement est adapté pour les cyclistes ou si ceux-ci sont uniquement tolérés au profit d'un autre usager. La règle *popUtiliseMain* (algorithme 7.6) permet de renseigner ces

**Algorithme 7.5** Règle *popUtiliseSens* pour affecter un sens de circulation à chaque voie

```
1: t_BDTOPO: un tronçon de la BDTOPO®
2: pour tout c ∈ {"SENS_CYC_G", "SENS_CYC_D"} faire
3:     tpiste = obtenirPisteTroncon(t_BDTOPO, c)
4:     listeV = voiesTroncon(tpiste)
5:     si ♯(listeV) == 2 alors
6:         peuplerSensVoie(listeV[1], "Direct")
7:         peuplerSensVoie(listeV[2], "Inverse")
8:     sinon si ♯(listeV) == 1 alors
9:         si t_BDTOPO.c == "Sens direct" alors
10:            peuplerSensVoie(listeV[1], "Direct")
11:        sinon
12:            peuplerSensVoie(listeV[1], "Inverse")
13:        fin si
14:    fin si
15: fin pour
16: t = obtenirTroncon(t_BDTOPO, c)
17: listeV = voiesTroncon(t)
18: si ♯(listeV) == 1 alors
19:    si t_BDTOPO.SENS == "Sens direct" alors
20:        peuplerSensVoie(listeV[1], "Direct")
21:    sinon si t_BDTOPO.SENS == "Double sens" alors
22:        peuplerSensVoie(listeV[1], "Double")
23:    sinon
24:        peuplerSensVoie(listeV[1], "Inverse")
25:    fin si
26: sinon
27:    si t_BDTOPO.SENS == "Sens direct" alors
28:        pour tout i ∈ [1, ♯(listeV)] faire
29:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Direct")
30:        fin pour
31:    sinon si t_BDTOPO.SENS == "Sens inverse" alors
32:        pour tout i ∈ [1, ♯(listeV)] faire
33:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Inverse")
34:        fin pour
35:    sinon
36:        pour tout i ∈ [1, ♯(listeV)/2] faire
37:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Direct")
38:            peuplerSensVoie(listeV[♯(listeV) + 1 − i], "Inverse")
39:        fin pour
40:    fin si
41: fin si
```

valeurs dans l'association *Utilise* à partir de l'association *SensVoie*. Nous définissons la fonction $getTroncon(v)$ qui renvoie le tronçon associé à la voie $v$. Nous définissons la fonction $getEntite(t)$ qui renvoie l'objet de la BDTOPO® correspondant au tronçon $t$.

**Algorithme 7.6** Règle *popUtiliseMain* pour affecter un sens de circulation à chaque voie

**pour tout** $uti \in bdrm.utilise$ **faire**
  $t = getTroncon(uti.idvoie)$
  $o = getEntite(t)$
  **si** $uti \notin sensVoie$ **alors**
    $uti.priorite =$ "$Interdit$"
  **sinon si** ($o.NATURE ==$ "$Type\ autoroutier$") *ou* ($o.NAT_RESTR \in$ {"$Passage\ barre$", "$Plot\ amovible$", "$Entree\ avec\ gardien$", "$Voie\ de\ tramway\ utilisable\ par\ les\ vehicules\ de\ secours$"}) **alors**
    $uti.priorite =$ "$Interdit$"
  **sinon si** $o.NAT_RESTR \in$ {"$Piste\ cyclable$", "$Bande\ cyclable$", "$Amenagement\ mixte\ hors\ voie\ verte$"} **alors**
    $uti.priorite =$ "$Adapte$"
  **sinon**
    $uti.priorite =$ "$Tolere$"
  **fin si**
**fin pour**

Ainsi, grâce à ces procédés nous pouvons peupler dans nombre de cas le sens des voies.

**Classe *NœudDuReseau* (nbAccParAn, croisement) et relation *Non-communications* (idnœud1, idnœud2, idvoie, idusager)** Concernant les nœuds du réseau, la couche de données de la BDTOPO® ne contient pas tout ce dont nous avons besoin. C'est pour cela que nous avons réalisé un traitement dans le SIG QGIS afin de les extraire. Nous avons utilisé le traitement *Extract specific vertices* sur le premier et le dernier point de chaque tronçon puis nous avons supprimé les doublons.

Une fois cette étape réalisée, nous avons apparié les non-communications de la BDTOPO® à ces nœuds du réseau. Nous ne cherchons pas de nouvelles non-communications liées aux attributs de la BDTOPO®.

**Classe *Itineraire* (idItineraire, nomItineraire, niveau, nomReseau, estCyclable)** Pour les itinéraires cyclables, l'attribut $ITI_CYCL$ indique la présence d'un ou plusieurs itinéraires cyclables sur un tronçon. Plusieurs itinéraires cyclables peuvent être notés sur un même tronçon séparés par un "/". Une première étape dans le peuplement de cette classe consiste à créer une table contenant l'ensemble des tuples entre un tronçon et un itinéraire. Cette table servira pour la relation

entre les tronçons et les itinéraires. En prenant uniquement les valeurs distinctes des itinéraires, nous obtenons la liste de ceux-ci. Nous illustrons ce principe avec la règle *creatIti* présentée dans l'algorithme 7.7. La fonction $peuplerItineraire(iti)$ crée une instance de la classe Itineraire avec l'objet *iti*.

**Algorithme 7.7** Règle *creatIti* pour la création des itinéraires

```
1: t_BDTOPO: un tronçon de la BDTOPO®
2: si t_BDTOPO.ITI_CYCL != null alors
3:     pour tout iti ∈ t_BDTOPO.ITI_CYCL.split('/') faire
4:         si iti ∉ bdrm.Itineraire alors
5:             peuplerItineraire(iti)
6:         fin si
7:     fin pour
8: fin si
```

**Classe *POI* (idPoint, geom, typePOI, nomPOI, url, poiCycliste)** Les points d'intérêts représentent l'ensemble des cimetières et une partie de la couche des ERP. Un ERP possède comme attributs $TYPE_1$ et $TYPE_2$ représentant chacun une possible catégorie. Les ERP ayant au moins l'un de ces deux attributs avec les valeurs suivantes sont intégrés à la classe des POI : GA (gares), M (magasins de vente, centres commerciaux), N (restaurants et débits de boissons), NALT (restaurant d'altitude), O (hôtels et pensions de famille), OA (hôtels-restaurants d'altitude), PN (petits ERP, de 5ème catégorie, spécificités petits restaurants et débits de boissons), PO (petits ERP, de 5ème catégorie, spécificités petits hôtels), U (établissements sanitaires) et X (établissements sportifs couverts). La règle *creatERP* présentée dans l'algorithme 7.8 illustre ces principes. La fonction $peuplerPOI(n)$ créé n instances de la classe *POI*.

**Algorithme 7.8** Règle *creatERP* pour la création des POI à partir des ERP

```
1: e_BDTOPO: un ERP de la BDTOPO®
2: si (e_BDTOPO.TYPE_1 ∈ {"GA", "M", "N", "NALT", "O", "OA", "PN", 'PO,", "U", "X"})
   ou (e_BDTOPO.TYPE_2 ∈ {"GA", "M", "N", "NALT", "O", "OA", "PN", "PO,", "U", "X"})
   alors
3:     peuplerPOI(1)
4: fin si
```

Pour les cimetières, nous réalisons un traitement dans un SIG pour transformer la géométrie de certains objets du polygone vers le point. Pour cela, nous récupérons le centroïde de chaque polygone.

**Classes de gestion de l'historique** Dans le cadre du peuplement du premier snapshot de la BDTOPO® dans la BDRM, uniquement des créations d'objets sont ajoutées dans la super-classe modifications. Nous avons décidé de ne pas ajouter d'instances de la classe modification d'attributs en partant d'une valeur vide vers la

première valeur de celui-ci. Ensuite, dans le cadre de l'ajout d'un second snapshot, nous réalisons d'abord l'instanciation de ce jeu de données à part avant de comparer les deux instances de la BDRM. Cela permet par la suite de peupler les classes *suppressionObjet* et *changementAttributs* en comparant les identifiants des nouveaux objets ou ceux ayant disparus dans le second snapshot. Il est aussi important de prendre en compte que nous n'avons pas réalisé de peuplement croisant deux bases de données différentes. L'appariement a donc été réalisé par comparaison des identifiants dans la BDRM source qui sont stockés dans la super classe modifications. La règle *modifAjout* illustre la manière dont les objets sont ajoutés à notre BDRM. Dans cette règle, nous considérons deux instances de notre BDRM. La première est identifiée par la variable $bdrm1$ qui est celle que l'on souhaite peupler et $bdrm2$ qui contient les nouvelles données que l'on souhaite ajouter à $bdrm1$. Nous réalisons avec ces règles un exemple sur la classe voie mais celle-ci est adaptable à toute classe, relation et association de notre BDRM. La fonction $peuplerAjout(o)$ créé une instance de la classe *Ajout* pour l'objet $o$.

**Algorithme 7.9** Règle *modifAjout* pour la gestion des objets ajoutés à notre BDRM

```
1: pour tout v ∈ bdrm2.Voie faire
2:     si v ∉ bdrm1.Voie alors
3:         peuplerVoie(1,t)
4:         peuplerAjout(v)
5:     fin si
6: fin pour
```

De manière analogue, nous proposons la règle *modifSuppression* dans l'algorithme 7.10. La fonction $peuplerSuppression(o)$ créé une instance de la classe *Suppression* pour l'objet $o$.

**Algorithme 7.10** Règle *modifSuppression* pour la gestion des objets supprimés de notre BDRM

```
1: pour tout voie ∈ bdrm1.Voie faire
2:     si voie ∉ bdrm2.Voie alors
3:         peuplerSuppression(voie)
4:     fin si
5: fin pour
```

Nous proposons aussi la règle *modifAttribut*, présentée dans l'algorithme 7.11 qui s'occupe des changements de l'ensemble des attributs. Cela inclut également les géométries qui sont comparées dans leur format en Well Known Binary. La fonction $peuplerChangementAttribut(o, attr)$ créé une instance de la classe *ChangementAttribut* pour l'objet $o$ et l'attribut $attr$. Nous n'utilisons cette règle uniquement quand nous savons qu'un objet même objet existe dans notre BDRM et dans le snapshot que nous souhaitons instancier.

Nous décidons de renseigner la date et l'heure de mise à jour de l'objet dans notre

**Algorithme 7.11** Règle *modifAttribut* pour la gestion des changements d'attributs de notre BDRM

```
1: pour tout voie ∈ bdrm1.Voie faire
2:     pour tout attr ∈ voie faire
3:         si attr != bdrm2.Voie.attr alors
4:             attr = bdrm2.Voie.attr
5:             peuplerChangementAttribut(voie,attr)
6:         fin si
7:     fin pour
8: fin pour
```

BDRM et de laisser de côté cette même information dans nos sources de données. Cependant, cette information est retrouvable car nous stockons l'identifiant ayant permis la création de chaque objet ainsi que son numéro de version dans la source de données. Pour la BDTOPO®, nous considérons le numéro de version comme la date du produit, en ne prenant en compte que le mois et l'année.

Maintenant que les règles d'instanciation de notre BDRM avec la BDTOPO® sont présentées, nous les illustrons à l'aide des exemples illustratifs présentés dans la section précédente.

### 7.2.2 Illustration avec les exemples

Cette sous-section illustre le fonctionnement de la BDRM adaptée à l'aide des deux exemples présentés dans la première section. Dans cette sous-section, plusieurs tableaux ne contiennent que les lignes dont nous souhaitons parler dans ce manuscrit. Afin de conserver plus de détails, des tableaux avec plus d'informations sont disponibles dans l'annexe C.

**Premier exemple** Le tableau 7.7 est une illustration du fonctionnement de la BDRM pour la classe *voie* sur le premier exemple proposé dans l'image 7.1 et traduite en tronçons de la BDTOPO® dans le tableau 7.1. Le tableau complet se trouve dans l'annexe C.1.

Avec cette instanciation par la BDTOPO®, nous avons dû nous appuyer sur certaines hypothèses pour le remplissage de certains attributs. Par exemple, le revêtement est renseigné en tant qu'asphalte pour toute voie faisant partie d'un tronçon étant considéré comme une route dans les données de départ. Ensuite, la largeur des bandes cyclables est automatiquement de 1 mètre, ce qui dans la réalité est loin d'être le cas, bien que cette valeur soit un bon compromis. Le tableau 7.7 offre un aperçu de la relation entre les voies et les tronçons avec ses deux premières colonnes. En effet, la première colonne représente l'identifiant du tronçon et la deuxième celui de la voie. Nous prenons le principe, pour l'illustration, d'identifier une voie avec l'identifiant de son tronçon puis un "_" puis un numéro obtenu en prenant les voies

TABLE 7.7 – Remplissage de la classe *voie* à partir de l'exemple 1 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Attributs / Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 0_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 3 |
| 3 | 3_1 | chemin | gravel | 1 |
| 5 | 5_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_3 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_4 | routier | asphalte | 3 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| 8 | 8_1 | zone de rencontre | asphalte | 2.5 |

dans l'ordre de saisie informatique de la géométrie de droite à gauche. Nous signalons aussi la présence d'une seule voie pour le tronçon 6. En effet, le double-sens cyclable n'est ici matérialisé que par un panneau, sans aucun marquage au sol pour les cyclistes pouvant prendre la rue à contre-sens par rapport aux voitures. Dans ce cas d'absence d'espace dédié aux cyclistes, nous ne comptabilisons pas cela comme une voie supplémentaire.

Le tableau 7.8 représente la relation *utilise* de la BDRM avec l'exemple de l'image 7.1. Les données au format de la BDTOPO® créées pour cet exemple sont disponibles dans le tableau 7.1. Dans la colonne usager, le 1 représente le vélo, le 2 représente le piéton et le 3 représente la voiture. Dans la colonne sens, le 1 représente le sens direct et le 2 représente le sens inverse. Le tableau complet se trouve dans l'annexe C.2

Dans ce tableau, nous n'avons pas ajouté les lignes évidentes comme la voie 1_1 pour tout usager dans le sens inverse qui est interdite (règle *popUtiliseSens*). Nous avons représenté l'usage cycliste en priorité et les usages piétons et de la voiture lorsque cela apporte un supplément à la compréhension du fonctionnement de la BDRM. D'abord, notons que les voies du tronçon 1 sont considérées comme "toléré" pour les cyclistes. Ce point servira dans la comparaison avec l'instanciation de la BDRM avec OSM. Ensuite, la voie 3_1 est "adapté" pour les piétons et "toléré" pour les cyclistes. Le fait de ne pas l'interdire pour les cyclistes est lié au manque d'informations de la BDTOPO® dans ce cas précis. Nous remarquons aussi l'absence de la voie 5_3 (règle *popUtiliseSens*) pour laquelle nous ne pouvons pas déterminer le sens de circulation. La voie 6_1 (règle *popUtiliseSens*) dispose aussi de particularités car elle est "adapté" pour la voiture mais seulement dans un sens alors que les cyclistes sont tolérés dans les deux sens. La largeur attribuée à chaque voie du tronçon 7 (règle *popVoieLargeur*) représente aussi un potentiel problème

TABLE 7.8 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 1 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 0_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 0_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 1_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |

de cohérence. Nous savons qu'une voie de circulation pour les voitures doit avoir une largeur d'au moins 3 mètres pour permettre une conduite confortable. Or, nous avons ici une largeur de 2.5m, qui est considérée comme un peu étroite. Concernant la voie 8_1, il s'agit d'une zone de rencontre accordant la priorité aux piétons. Elle est utilisable dans les deux sens dans l'exemple que nous proposons.

Concernant les itinéraires cyclables (règle *creatIti*), nous observons deux itinéraires qui sont BicyBlois et Véloire. La BDTOPO® ne fournit pas plus d'informations pour peupler les autres attributs.

Maintenant que nous avons instancié la première version du premier exemple, nous allons instancier la deuxième version de cet exemple dans notre BDRM.

**Premier exemple, version 2** La version 2 du premier exemple, qui est une version ultérieure de l'exemple 1, est d'abord instanciée de la même manière que la première version. Ensuite, les deux instances de la base de données sont regroupées entre elles afin de ne conserver que les lignes nécessaires dans les parties liées aux géométries et de créer un historique complet. Dans ce sens, le tableau 7.9 présente le peuplement de la classe *voie* selon la version 2 de l'exemple 1. Le tableau complet est disponible dans l'annexe C.3.

La principale différence se trouve dans la suppression de bandes cyclables sur le tronçon 7 pour avoir à la place deux pistes cyclables unidirectionnelles. De plus, un nouveau tronçon - le 9 - parallèle au tronçon 2 est apparu. Pour la piste cyclable parallèle au tronçon 1, nous considérons que le changement d'identifiant du tronçon amène à la création d'un nouveau tronçon au lieu de modifier la géométrie du tronçon 0 de la version 1. Le tableau 7.10 présente le peuplement de la relation *utilise* selon la version 2 de l'exemple 1. La version complète de ce tableau est disponible en annexe C.4.

Les nouvelles voies créées sont bien répercutées dans la relation *utilise*. Main-

TABLE 7.9 – Remplissage de la classe *voie* à partir de l'exemple 1, version 2 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 10_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 10_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 3 | 3_1 | chemin | gravel | 1 |
| 5 | 5_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_3 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_4 | routier | asphalte | 3 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| 7 | 7_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 7_3 | routier | asphalte | 2.5 |
| 8 | 8_1 | zone de rencontre | asphalte | 2.5 |
| 11 | 11_1 | piste cyclable | asphalte | |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |

TABLE 7.10 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 1, version 2 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 7_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté |
| 7_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |
| 10_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 10_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 11_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Impossible | Impossible |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Impossible | Impossible |

tenant que nous disposons des tableaux pour les deux versions de l'exemple pour la classe *voie* et la relation *utilise*, nous créons une instance de la super-classe *modifications* dans le tableau 7.11. Ce tableau contient d'abord le nom de la classe concernée (ajout d'objet, suppression d'objet, modification d'attribut) puis les attributs classiques de chaque classe. Seules les classes *tronçon* et *voie* sont utilisées dans ce tableau.

**Deuxième exemple** Nous présentons maintenant le tableau 7.12 (version complète en annexe C.5) qui contient le contenu de la classe *voie* de la BDRM pour le deuxième exemple qui est proposé sur l'image 7.3 et dont le contenu traduit pour la BDTOPO® est disponible dans le tableau 7.5.

Nous remarquons dans ce tableau l'absence d'information concernant les voies piétonnes sur les tronçons 12 à 15. Cette information est perdue par la structure de données de la BDTOPO® qui ne représente que la partie cyclable du tronçon en abandonnant la partie piétonne. Le tableau 7.13 présente le peuplement de la relation *utilise* avec l'exemple 2. La version complète de ce tableau est disponible en annexe C.6.

Les problèmes de la classe *voie* sont répercutés dans la relation *utilise* avec par exemple l'absence d'une voie adaptée aux piétons sur les tronçons 12, 13, 14 et 15. Les cyclistes sont tolérés sur le rond-point, ce qui est un point de vigilance dans la comparaison avec l'instanciation d'OSM.

### 7.2.3 Données utilisées

Les jeux de données utilisés sont deux versions de la BDTOPO® de l'IGN. La première version est celle de septembre 2023 et la seconde est celle de mars 2024. Ces deux jeux de données correspondent à la version 3.3 de la BD TOPO® qui contient plus d'attributs cyclables que les versions précédentes. La zone d'étude choisie est le département du Loir-et-Cher. Parmi les nombreux jeux de données thématiques de la BDTOPO®, nous utilisons les suivants :

- TRONCON_DE_ROUTE : ils sont utilisés à la fois pour les routes mais aussi pour les intersections après un traitement dans un SIG.
- ERP (Établissement Recevant du Public) : ils permettent aux cyclistes de se ravitailler (restaurants, bars, gymnases etc.). Ils sont considérés comme des points d'intérêt.
- Cimetières : une grande majorité des cimetières est équipée d'eau potable. Ils sont donc considérés comme des points d'intérêt importants pour les cyclistes.
- NON_COMMUNICATION : impossibilité de passer d'un tronçon à un autre sur une intersection précise dans le monde réel alors alors que la simple visualisation des tronçons de route de la BDTOPO® laisse croire le contraire. Cela correspond à un sous-ensemble des nœuds du réseau routier.

Avec ces données, il nous faut tenir compte de la qualité de celles-ci. La qualité de ces données est réputée comme bonne mis à part le fait que les changements peuvent mettre du temps à remonter dans cette base de données.

TABLE 7.11 – Remplissage de la super classe de gestion de l'historique à partir de l'exemple 1, version 2 adapté à la BDTOPO®

| classe | identifiant modification | nomTable | dateMaj | sourceChangement | idObjetSource | versionObjetSource | idObjet | nomAttribut | ancienneValeur | nouvelleValeur |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| suppression | 1 | troncon | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v1 | 0 | | | |
| suppression | 2 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v1 | 0_1 | | | |
| suppression | 3 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v1 | 0_2 | | | |
| ajout | 4 | troncon | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v2 | 10 | | | |
| ajout | 5 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v2 | 10_1 | | | |
| ajout | 6 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 1 | v2 | 10_2 | | | |
| changementAttribut | 7 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 8 | v2 | 8_1 | geom | AF52DLJ | DG6587FD |
| ajout | 8 | troncon | 02/02/1900 | BDTOPO® | 2 | v2 | 9 | | | |
| ajout | 9 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 2 | v2 | 9_1 | | | |
| ajout | 10 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 2 | v2 | 9_2 | | | |
| suppression | 11 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v1 | 7_1 | | | |
| ajout | 12 | troncon | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v2 | 12 | | | |
| ajout | 13 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v2 | 12_1 | | | |
| suppression | 14 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v1 | 7_4 | | | |
| ajout | 15 | troncon | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v2 | 11 | | | |
| ajout | 16 | voie | 02/02/1900 | BDTOPO® | 7 | v2 | 11_1 | | | |

TABLE 7.12 – Remplissage de la classe *voie* à partir de l'exemple 2 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 6_2 | routier | asphalte | 3 |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 20 | 20_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 20_2 | routier | asphalte | 4 |
| | 20_3 | bande cyclable | asphalte | 1 |

TABLE 7.13 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 2 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 1_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 12_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 20_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré | Interdit |
| 20_2 | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté |
| 20_3 | Interdit | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré |

TABLE 7.14 – Évolution de la longueur des voies (en km) par type d'aménagement créées à partir de la BDTOPO®

| Type d'aménagement | Décembre 2023 | Mars 2024 |
|---|---|---|
| Infrastructures cyclables | 1259.0 | 978.9 |
| Réseau piéton | 190384.4 | 124204.4 |
| Réseau des véhicules à moteur | 168521.4 | 128290.0 |
| Total | 360164.7 | 253473.3 |

### 7.2.4 Résultats et discussion

Cette sous section concerne les résultats issus de l'implémentation de deux snapshots de la BDTOPO®. Pour commencer l'analyse des résultats, nous commençons par le tableau 7.14 donnant la longueur des voies par famille d'infrastructures (cf. chapitre 5) créées à partir de la BDTOPO®.

Dans ce tableau, nous observons une diminution très forte de la longueur totale chez toutes les familles d'infrastructures. Cette baisse n'est pas liée à notre BDRM mais principalement à une campagne de mise à jour dans la BDTOPO®.

Ensuite, nous avons calculé le ratio entre le nombre de voies et le nombre de tronçons dans chaque snapshot. Étant donné que dans le monde réel, la majorité des routes est composée de deux voies, nous nous attendons à un ratio d'environ 2 ou légèrement inférieur avec les chemins de randonnée. Nous avons obtenus environ 2.1 millions de voies pour 1.1 millions de tronçons dans le snapshot de décembre 2023. Dans le snapshot de mars 2024, le nombre de tronçons est stable, or celui des voies a largement diminué à 1.5 millions. Le fait de passer d'un ratio de presque 2 à presque 1.5 en 4 mois est cohérent avec le paragraphe précédent mais l'explication reste inconnue. Afin de résoudre ce problème, nous avons calculé la distance totale dans les tronçons de la BDTOPO® groupée par nombre de voies sur le tronçon mais cela n'a donné aucun résultat concluant. Une hypothèse est que certains tronçons ayant un nombre de voies important ont été fusionnés.

Pour ce qui est des voies dans la relation *utilise*, nous trouvons environ 10 000 voies sur deux millions ($\sim 0.5\%$) qui ne sont pas présentes dans la relation *utilise* dans le snapshot de décembre. Ces 10 000 voies ne sont plus présentes dans le snapshot de 2024.

En ce qui concerne la largeur des voies, elle n'est que très peu présente avec uniquement 561 voies sur deux millions ($\sim 0.028\%$) qui ont une valeur de renseignée en décembre 2023 et 523 voies sur 1.5 millions ($\sim 0.035\%$) en mars 2024. Ce point est un problème majeur dans l'application d'un algorithme de modification des géométries en accord avec la place de chaque voie dans le tronçon.

Pour l'évolution entre le snapshot de décembre 2023 et de mars 2024, nous trouvons l'ajout d'environ 6 000 voies pour la suppression d'environ 640 000 autres voies.

Pour conclure cette section concernant la BDTOPO®, nous constatons que l'instanciation de la BDRM adaptée est possible avec les exemples que nous avons pro-

posé. La seule perte que réalise la BDTOPO® concerne les voies piétonnes qui se trouvent sur le rond-point pour les cyclistes où le partage de la voirie n'est pas assuré par cette BDRM. Cependant, la qualité des données réelles n'est pas suffisante pour réaliser le peuplement. En effet, la largeur des tronçons n'est que très rarement renseignée et il est possible que les valeurs soient aberrantes lors du calcul de la largeur des voies. Cet attribut étant important dans notre BDRM, cela rend l'instanciation de celle-ci complexe.

Après avoir expliqué les points forts et les points faibles de la BDTOPO® dans l'instanciation de notre BDRM adaptée, nous allons faire de même avec OSM.

## 7.3 Peuplement avec OSM

Cette section présente l'instanciation de la BDRM adaptée au cyclisme avec les données d'OSM. Elle suit le même plan que la section précédente à la différence qu'un seul snapshot a été implémenté pour cette base de données, les résultats n'apportant aucune nouvelle information. Seuls le premier snapshot de l'exemple 1 ainsi que l'exemple 2 serviront d'exemples dans cette section. De plus, nous nous sommes concentrés sur l'instanciation de la partie linéaire de la BDRM. Les parkings pour vélos, les entraves et les points d'intérêts sont donc laissés de côté dans cette section.

Les questions traitées dans cette section sont les mêmes que celles de la section précédente mais adaptées à OSM. Nous savons que cette BDRM a aussi des problèmes de qualité (chapitre 2) mais qui sont différents de ceux de la BDTOPO®.

### 7.3.1 Règles d'instanciation

L'instanciation de la BDRM adaptée avec OSM suit le même principe que celle de la BDTOPO®. Pour cette raison, cette sous-section est structurée de la même manière.

**Classe *Troncon* (idTronçon, qualitePanorama, directionVent, forceMoyenneVent, penteMax, penteMoyenne, quantiteEclairage, bruit, nbAccidents, trafic)** Chaque objet récupéré dans OSM représente un tronçon. La règle *creatOSM* (algorithme 7.12) est l'équivalent de la règle *creatC* présentée pour la BDTOPO®. La seule différence est qu'il n'y a pas de tronçons supplémentaires créés à partir d'attributs des tronçons d'OSM (selon le guide de bonnes pratiques d'OSM [1]). Cela implique l'absence d'équivalent à la règle *creatG* pour l'instanciation à partir d'OSM.

**Classe *Voie* (idVoie, typeAmenagement, revetement, vitesseMax, largeur, geom)** L'instanciation de la BDRM avec OSM suit le même principe qu'avec

1. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/FR:Bicycle

**Algorithme 7.12** Règle *creatOSM* pour la création des tronçons et de leurs voies

1: $t_{OSM}$: *un troncon d'OSM*
2: $peuplerTroncon(t_{OSM})$
3: **si** $t_{OSM}.lanes \in \{0, null\}$ **alors**
4: $peuplerVoie(1, v)$
5: **sinon**
6: $peuplerVoie(lanes)$
7: **fin si**
8: **si** $t_{OSM}.cycleway{:}\,right ==$ "*lane*" *ou* $t_{OSM}.cycleway{:}\,both ==$ "*lane*" **alors** ▷ Bloc pour les bandes cyclables à droite
9: $peuplerVoie(1)$
10: **fin si**
11: **si** $t_{OSM}.cycleway{:}\,left ==$ "*lane*" *ou* $t_{OSM}.cycleway{:}\,both ==$ "*lane*" **alors** ▷ Bloc pour les bandes cyclables à gauche
12: $peuplerVoie(1)$
13: **fin si**
14: **si** $t_{OSM}.ramp{:}\,bicycle ==$ "*yes*" **alors** ▷ Bloc pour les goulottes ou rampes
15: $peuplerVoie(1)$
16: **fin si**

la BDTOPO® où l'on compte le nombre de voies sur chaque tronçon issu de la source puis on détermine leur nature. L'ensemble de la démarche de peuplement est donnée dans l'algorithme 7.12 et expliquée dans ce qui suit.

Nous faisons l'hypothèse forte que deux tronçons au sens de notre BDRM ne seront jamais représentés sur un seul tronçon dans OSM, en accord avec les consignes de contributions. Cependant, ce point est difficilement vérifiable à cause de l'hétérogénéité d'OSM.

Pour calculer le nombre de voies, nous commençons par calculer le nombre de voies pour les véhicules à moteurs avant d'ajouter celles pour les autres usagers.

Lorsque le nombre de voies n'est pas renseigné ou de 0, nous créons une seule voie pour le tronçon concerné. Sinon, nous prenons la valeur du tag *lanes*.

Pour les pistes cyclables, lorsque celles-ci sont bidirectionnelles, nous créons une voie pour chaque sens de circulation.

Si une bande cyclable est présente sur un tronçon avec les tags *cycleway,* $cycleway{:}\,right$, $cycleway{:}\,left$ ou $cycleway{:}\,both$, nous ajoutons le nombre de bandes cyclables au nombre total de voies.

Nous passons maintenant à l'instanciation des attributs de la classe voie.

Le peuplement reprend les mêmes principes que celui de la BDTOPO® en adaptant les attributs à ceux d'OSM. Pour la limitation de vitesse, le tag *maxspeed* contient la limitation de vitesse pour un tronçon donné. Cependant, la limitation peut être donnée de plusieurs autres manières. Par exemple, plusieurs valeurs séparées par un / permettent de donner la limitation pour chaque voie de circulation. De plus, les tags $maxspeed{:}\,forward$ et $maxspeed{:}\,backward$ fournissent la limitation

de vitesse dans le sens direct et le sens inverse de modélisation du tronçon. L'attribut n'est pas renseigné quand aucun des attributs cités n'est rempli. Les vitesses dans une autre unité que les km/h ne sont pas prises en compte.

Concernant la largeur des voies de circulation, nous reprenons les mêmes hypothèses réalisées pour la BDTOPO® et nous appliquons le même principe de calcul. La largeur n'est renseignée que lorsque le tag *width* est présent avec une valeur valide. La règle *popVoieLargeurOSM* présentée dans l'algorithme 7.13 illustre l'ensemble de ces principes pour l'attribut *largeur*.

**Algorithme 7.13** Règle *popVoieLargeurOSM* pour le peuplement de l'attribut *largeur* des instances de la classe *voie*

1: $larg\mathcal{N}bc = 1$ ▷ largeur bande cyclable par défaut
2: $t_{OSM}$: *un tronon d'OSM*
3: $t = obtenirTroncon(t_{OSM}, c)$
4: $listeV = voiesTroncon(t)$
5: $nbVoies = nombre\ de\ voies\ motorisees\ d'un\ troncon$
6: **si** t_OSM.cycleway :right == "*lane*" *or* t_OSM.cycleway :both == "*lane*" **alors**
7: $bdrm.voie.largeur = larg\mathcal{N}bc$
8: $t_{OSM}.width = t_{OSM}.width - larg\mathcal{N}bc$
9: **fin si**
10: **si** t_OSM.cycleway :left == "*lane*" *or* t_OSM.cycleway :both == "*lane*" **alors**
11: $bdrm.voie.largeur = larg\mathcal{N}bc$
12: $t_{OSM}.width = t_{OSM}.width - larg\mathcal{N}bc$
13: **fin si**
14: **pour tout** $v \in listeV$ **faire**
15: $v.largeur = t_{OSM}.width\ /\ nbVoies$
16: **fin pour**

Pour la géométrie, nous appliquons les mêmes pratiques que pour la BDTOPO® en ne modifiant pas la géométrie des tronçons.

**Association *Utilise* (idvoie, idusager, idsens, priorite)** Pour l'association *Utilise*, de nombreux attributs permettent d'établir quel régime de priorité est appliqué sur chaque voie. D'abord, à l'échelle du tronçon, le tag *highway* donne une première idée de l'usage prioritaire d'une voie en l'accordant aux cyclistes dans le cas de la valeur *cycleway* ou aux voitures dans le cas de la valeur *primary* par exemple. Ensuite, afin de représenter les usages secondaires, les tags *bicycle* et *foot* permettent de renseigner le fait que le cycliste ou le piéton a le droit d'emprunter une infrastructure, est interdit ou doit se référer à une autre infrastructure (piste cyclable ou trottoir parallèle). Dans le cas où un usage est autorisé, il faut aussi savoir le sens dans lequel un usage est toléré ou adapté sur une voie. Pour cela, OSM dispose du tag *oneway* pour les voitures et de *oneway*:*bicycle* pour les cy-

clistes. Ces tags, quand leur valeur est *yes*, indiquent que le tronçon n'est qu'à sens unique bien qu'ils ne donnent pas le sens de circulation. Une norme d'OSM veut que le sens de circulation soit le sens direct mais il faut que celle-ci soit respectée par les contributeurs. Pour illustrer ces principes nous créons deux règles *popUtiliseSensOSM* (algorithme 7.14) et *popUtiliseMainOSM* (algorithme 7.15), analogues à *popUtiliseSens* et *popUtiliseMain* pour d'abord trouver les instances de la table *utilise* où les cyclistes sont tolérés puis nous cherchons à savoir si l'usage cycliste est toléré ou adapté.

**Algorithme 7.14** Règle *popUtiliseSensOSM* pour affecter un sens de circulation à chaque voie

```
1: t_OSM: un troncon d'OSM
2: t = obtenirTroncon(t_OSM, c)
3: listeV = voiesTroncon(t)
4: si ♯(listeV) == 1 alors
5:     si t_OSM.oneway: bicycle == "yes" ou (t_OSM.oneway: bicycle == "null" et
   t_OSM.oneway == "yes" et bicycle != "no") alors
6:         peuplerSensVoie(listeV[1], "Direct")
7:     sinon
8:         peuplerSensVoie(listeV[1], "Double")
9:     fin si
10: sinon
11:    si t_OSM.oneway: bicycle == "yes" ou (t_OSM.oneway: bicycle == "null" et
   t_OSM.oneway == "yes" et bicycle != "no" alors
12:        pour tout i ∈ [1, ♯(listeV)] faire
13:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Direct")
14:        fin pour
15:    sinon si t_OSM.lanes: forward !=null et t_OSM.lanes: backward !=null alors
   ▷ Si le nombre de voies dans le sens direct et inverse est defini
16:        pour tout i ∈ [1, lanes: forward] faire
17:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Direct")
18:        fin pour
19:        pour tout i ∈ [1, lanes: backward] faire
20:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Inverse")
21:        fin pour
22:    sinon
23:        pour tout i ∈ [1, ♯(listeV)/2] faire
24:            peuplerSensVoie(listeV[i], "Direct")
25:            peuplerSensVoie(listeV[♯(listeV) + 1 − i], "Inverse")
26:        fin pour
27:    fin si
28: fin si
```

**Algorithme 7.15** Règle *popUtiliseMainOSM* pour affecter un sens de circulation à chaque voie

**pour tout** $uti \in bdrm.utilise$ **faire**
  **si** $uti \notin sensVoie$ **alors**
    $uti.priorite =$ "$Interdit$"
  **sinon si** ($highway \in$ {"$highway$",) "$highway_link$", "$trunk$", "$trunk_link$"} *ou* $bicycle ==$ "$no$" **alors**
    $uti.priorite =$ "$Interdit$"
  **sinon si** $highway ==$ "$cycleway$" *ou* $cycleway{:}right ==$ "$lane$" *ou* $cycleway{:}left ==$ "$lane$" *ou* $cycleway{:}both ==$ "$lane$" *ou* $cyclestreet ==$ "$yes$" **alors**
    $uti.priorite =$ "$Adapte$"
  **sinon**
    $uti.priorite =$ "$Tolere$"
  **fin si**
**fin pour**

**Classe *Itineraire* (idItineraire, nomItineraire, niveau, nomReseau, estCyclable)** Les itinéraires cyclables sont stockés dans des *relations*. Dans OSM, les *relations* représentant les itinéraires cyclables sont totalement indépendantes des tronçons de route contrairement à la BDTOPO®. Les objets de type *relation* peuvent être vus comme des listes d'objets OSM (*nodes, ways, relations*). En décomposant ces listes, nous créons une table intermédiaire contenant l'ensemble des tronçons affiliés à leurs itinéraires respectifs. Le tag *route* identifie les itinéraires cyclables qu'ils soient sur la route (*bicycle*) ou dans des chemins (*mtb*). Ensuite, le tag *network* permet d'identifier la portée géographique de l'itinéraire cyclable avec les valeurs *lcn, rcn, ncn et icn* signifiant respectivement un itinéraire local, régional, national et international.

L'objet $r_{OSM}$ représente une *relation* d'OSM. La règle *creatItiOSM* (algorithme 7.16) illustre le procédé d'obtention des itinéraires et le peuplement des attributs *nomIti, reseau et niveau*.

**Algorithme 7.16** Règle *creatItiOSM* pour la création des itinéraires

$r_{OSM}$: *une relation d'OSM*
**si** $r_{OSM}.route$ *in* {"$mtb$", "$bicycle$"} **alors**
  $peuplerItineraire(1)$
  $bdrm.itineraire.nomIti = r_{OSM}.name$
  $bdrm.itineraire.reseau = r_{OSM}.cycle_network$
  $bdrm.itineraire.niveau = r_{OSM}.network$
**fin si**

Il est important de noter la présence de *super relations* pour les itinéraires très longs. Ces objets sont renseignés comme des relations composées d'autres relations

amenant des doublons dans les itinéraires cyclables (par exemple, la super relation "La Loire à Vélo" et la relation "La Loire à Vélo, tronçon Orléans - Tours").

Maintenant que nous avons présenté les principales règles d'instanciation, nous les illustrons avec les exemples de la première section.

### 7.3.2 Illustration avec les exemples

Nous illustrons les principes évoqués dans la sous-section précédente avec la première version du premier exemple et le second exemple. Dans cette sous-section, plusieurs tableaux ne contiennent que les lignes dont nous souhaitons parler dans ce manuscrit. Afin de conserver plus de détails, des tableaux avec plus d'informations sont disponibles dans l'annexe C.

**Exemple 1** Pour la classe *voie* de l'exemple 1, les résultats obtenus sont identiques à ceux de la BDTOPO® donc le tableau 7.7 représente aussi les résultats de l'instanciation pour la classe *voie* avec OSM. Par contre, la relation *utilise* a subi quelques modifications donc les résultats de l'instanciation pour cet exemple sont représentés dans le tableau 7.15. Le tableau complet est disponible en annexe C.7.

TABLE 7.15 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 1 adapté à OSM

| **Usager** | **vélo** | | **piéton** | | **voiture** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sens** / **id_voie** | **direct** | **inverse** | **direct** | **inverse** | **direct** | **inverse** |
| 0_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 0_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 1_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |

Dans ce tableau, nous constatons que les voies du tronçon 1 sont interdites aux cyclistes. Cela est causé par le tag *bicycle* = *use_sidepath* qui interdit l'usage d'une

TABLE 7.16 – Remplissage de la classe *voie* à partir de l'exemple 2 adapté à OSM

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 6 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 6 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 6 |
| | 6_2 | routier | asphalte | 6 |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_2 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_3 | piéton | asphalte | |
| 18 | 18_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 18_1 | piste cyclable | asphalte | |
| 20 | 20_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 20_2 | routier | asphalte | 5 |
| | 20_3 | bande cyclable | asphalte | 1 |

route aux cyclistes quand une piste cyclable parallèle à cette route existe. Cela est expliqué dans la règle *popUtiliseMainOSM*. Pour le reste, le contenu de cette classe est identique à celui obtenu avec la BDTOPO®.

**Exemple 2** Le tableau 7.16 contient l'ensemble des voies présentes dans la BDRM en partant des données OSM de l'exemple 2. Le tableau complet est disponible en annexe C.8.

Ce tableau se rapproche dans sa globalité de celui de la BDTOPO® sauf pour les tronçons composant le rond point pour les cyclistes et les piétons où les voies pour les piétons sont apparues. En effet, la capacité d'OSM a représenter des voies pour des usages secondaires permet ici de représenter l'ensemble des usages, ce qui se traduit par une meilleure implémentation dans notre BDRM. Nous continuons avec le tableau 7.17 contenant le détail de la relation *utilise* pour l'exemple 2. Le tableau complet est disponible dans l'annexe C.9.

Le contenu de ce tableau suit la logique du précédent avec seulement des lignes supplémentaires ajoutées dans les deux sens pour les piétons sur leur voie réservée des tronçons 12 à 15. Maintenant que le fonctionnement de la BDRM est expliqué, nous présentons les résultats de l'instanciation d'un snapshot d'OSM dans notre BDRM.

### 7.3.3 Données utilisées

Le jeux de données utilisé est l'extraction de Geofabrik du 1$^{er}$ janvier 2024. Il regroupe l'intégralité des objets OSM (nodes, ways et relations) de la région Centre Val-de-Loire. Nous ne nous préoccupons dans un premier temps que des routes (objets linéaires ayant le tag *highway* non nul et différent de *no*). Les nœuds du réseau sont extraits par l'utilisation dans un SIG du traitement *Extract specific vertices* sur le premier et le dernier point de chaque tronçon puis par la suppression des

Table 7.17 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 2 adapté à OSM

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 1_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 12_2 | Interdit | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 12_3 | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté | Interdit | Interdit |
| 18_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 18_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 20_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré | Interdit |
| 20_2 | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté |
| 20_3 | Interdit | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré |

doublons. Le snapshot OSM du 1*er* mars 2024 n'étant pas disponible sur Geofabrik, nous ne pouvons pas comparer les deux bases de données à la même date.

### 7.3.4 Résultats et discussion

Cette sous section concerne les résultats issus de l'implémentation d'un snapshot d'OSM. Pour commencer l'analyse des résultats, nous commençons par le tableau 7.18 donnant la longueur des voies par famille d'infrastructures (cf. chapitre 5) créées à partir d'OSM.

Table 7.18 – Évolution de la longueur des voies (en km) par type d'aménagement créés à partir d'OSM

| Famille d'infrastructures | Longueur |
|---|---|
| Infrastructures cyclables | 3379.228 |
| Réseau piéton | 10279.18 |
| Réseau des véhicules à moteur | 150190.5 |
| Total | 163848.9 |

Ces longueurs sont comparables à celles du tableau 7.14 et nous constatons que la longueur des infrastructures cyclables est plus de deux fois plus élevée dans OSM par rapport au meilleur snapshot de la BDTOPO®. Ensuite, le réseau piéton souffre d'un manque de données dans OSM et le réseau des véhicules à moteur a des chiffres comparables dans les deux bases de données.

Concernant le ratio entre le nombre de voies et le nombre de tronçons, il est à environ 1.05 (511 000 voies pour 489 000 tronçons, 4.5%) ce qui est extrêmement faible par rapport à nos attentes (environ 2). Ce chiffre est principalement expliqué par l'absence du nombre de voies (tag *lanes*) sur les routes. En effet, dans notre

snapshot, seulement un peu moins de 22 000 tronçons sur 489 000 disposent de ce tag, ce qui est beaucoup trop faible. Le même problème se pose concernant la largeur quand seulement 2437 ways dans OSM ont le tag *width* renseignée, ce qui rend le calcul de la largeur des voies impossible si l'on ne connaît pas celle du tronçon d'origine.

De manière générale, les résultats de l'instanciation avec OSM montrent une plus grande présence d'infrastructures cyclables que dans la BDTOPO® indiquant que l'usage cycliste est mieux représenté dans l'instanciation avec OSM. Cependant, de nombreux attributs semblent manquer dans OSM et la BDTOPO® peut aider à en remplir certains. C'est dans cette optique que nous allons comparer en détails les deux peuplements.

## 7.4 Comparaison des deux peuplements

L'objectif de cette section est de comparer l'instanciation de la BDRM avec la BDTOPO® et avec OSM afin de voir si l'une de ces deux sources de données est plus propice à l'utilisation d'un modèle de voies. Nous nous questionnons aussi sur la pertinence d'un appariement entre ces deux bases de données avant d'instancier la BDRM.

### 7.4.1 Qualité des données

Cette partie sur la qualité des données va principalement aborder la complétude des différentes tables du modèle. D'abord, nous n'avons pu compléter aucun attribut de la classe *tronçon* mis à part l'identifiant. La pente aurait pu être peuplée pour la BDTOPO® qui propose des géométries en 3 dimensions mais cette information n'est pas disponible pour l'ensemble des tronçons. De plus, nous avons trouvé des incohérences, avec, par exemple, des pentes supérieures à 100%. Sur ce point, OSM dispose du tag *slope* qui n'est que très rarement rempli et avec des informations hétérogènes (information en pourcentage, en degré, un mot pour dire que la pente est raide etc.).

Pour le revêtement des voies, les valeurs sont tout le temps renseignées dans la BDTOPO®. Cependant, l'information est calculée à partir de l'attribut NATURE de la BDTOPO®. Or cet attribut ne dispose que de 10 modalités qui ne sont pas suffisantes pour représenter l'ensemble des routes françaises de ce point de vue là. Nous avons donc une quantité d'erreurs qui est difficilement estimable dans notre BDRM sur cet attribut. Concernant OSM, le tag *surface* donne une valeur de revêtement, bien qu'il ne soit pas souvent renseigné dans OSM (complétude d'environ 20%). Pour les tronçons où il n'est pas renseigné, nous utilisons la même logique que pour la BDTOPO® en replaçant l'attribut NATURE par le tag *highway* qui propose un choix de valeurs beaucoup plus large.

Pour la largeur de la route, les deux sources de données peuvent avoir cette information mais ont un manque majeur de complétude, la BDTOPO® étant légèrement mieux lotie qu'OSM sur ce point.

Pour la vitesse maximale, la BDTOPO® donne une valeur de la vitesse moyenne permettant de retrouver une vitesse maximale théorique pour tout tronçon. Pour OSM, le tag *maxspeed* est renseigné sur un peu plus de 10% des tronçons, ce qui est peu. Cependant, les panneaux de limitation de vitesse sont renseignés dans OSM et donnent un autre moyen de retrouver cette information, mais cette reconstitution demande un travail de manipulation des données avancé.

Pour les itinéraires, des problèmes de cohérence ont été retrouvés dans la BDTOPO® pour les noms des itinéraires. Par exemple, un itinéraire est appelé sur deux tronçons "Loire à Vélo" puis, sur un tronçon se trouvant entre les deux précédents, l'itinéraire s'appelle "Loire à Vélo, EuroVélo 4" alors que ces deux itinéraires sont communs sur la partie de la zone d'étude où nous avons constaté le problème. Il faut donc prévoir une phase de nettoyage des données avant de s'en servir. Pour OSM, les itinéraires étant sur des relations individuelles, il est beaucoup plus facile de récupérer les itinéraires cyclables. D'autres types d'itinéraires sont aussi récupérables comme ceux de randonnées. Le coût computationel est un peu plus élevé pour OSM que sur la BDTOPO® hormis le nettoyage mais les données d'OSM sont dans ce cas de meilleure qualité. De plus, l'information sur l'échelle géographique de l'itinéraire cyclable n'est communiquée que dans OSM.

### 7.4.2 Qualité du réseau cyclable

Un premier point de comparaison entre les deux instanciations est visible dans le premier exemple présenté par l'image 7.1. En effet, le tronçon 1 est marqué dans OSM comme interdit aux cyclistes grâce à l'utilisation du tag *bicycle* = *use_ sidepath*, ce qui a été répercuté dans la BDRM. Or, dans la version de la BDTOPO®, cette information n'est pas accessible car il n'y a pas d'attribut indiquant l'accès des cyclistes comme il y en a un pour les piétons et les voitures.

Le deuxième exemple met en valeur une autre faiblesse de la BDTOPO®. Elle concerne cette fois le rond point pour les cyclistes et les piétons. Dans la BDTOPO®, la voie piétonne n'existe pas alors qu'OSM a la capacité de la faire apparaître. Dans la BDRM à partir de la BDTOPO®, les piétons doivent circuler sur une piste cyclable où ils sont tolérés mais pas vraiment en sécurité alors qu'une voie dédiée est disponible pour cet usage mais non représentée dans la BDTOPO®.

La flexibilité d'OSM rend beaucoup plus facile l'arrivée d'infrastructures récentes (la vélorue étant la plus récente). La BDTOPO® vient seulement de proposer une solution pour représenter les CVCB (cf section 5.1.1) qui existent depuis quelques années alors que de nouvelles infrastructures cyclables existent déjà.

### 7.4.3 Complémentarité des deux peuplements

A travers ce chapitre, nous avons vu qu'OSM dispose de données beaucoup plus à jour concernant l'usage du cyclisme que la BDTOPO®. Or les données de l'IGN ont une meilleure qualité pour leur usage principal grâce à d'anciennes campagnes d'acquisition de données. Certains attributs comme la largeur ou la pente (issue des

géométries en 3 dimensions) sont plus présents dans la BDTOPO® que dans OSM mais OSM dispose d'informations uniques comme l'échelle des itinéraires cyclables ou la possibilité d'interdire une route à un usage si une voie parallèle dédiée à cet usage existe. Concernant les itinéraires cyclables, la structuration d'OSM en relations nous fait penser qu'il est plus facile de créer ce type d'objets dans cette source de données. De plus, nous avons l'information concernant l'échelle géographique de l'itinéraire et le nom du réseau auquel un itinéraire fait partie.

## 7.5 Conclusion

Nous avons montré comment la BDRM définie dans le chapitre 6 est instanciable avec la BDTOPO® et OSM. Ce chapitre répond de manière formelle à la question $\mathcal{Q}1.3$ concernant la granularité à laquelle une BDRM doit présenter ses données. Une représentation à l'échelle de la voie de circulation apporte beaucoup plus de détails au réseau routier qu'une représentation en tronçons, surtout pour les usages secondaires de chaque tronçon.

Afin de répondre à la problématique de recherche $\mathcal{P}2$ concernant la faisabilité de l'instanciation d'une BDRM à l'échelle de la voie de circulation, nous avons proposé dans ce chapitre un ensemble de règles de transformation des données sources et de complétion des données stockées. Nous montrons qu'il est ainsi possible d'instancier notre BDRM à partir des données pour les exemples illustratifs que nous avons proposé. Ainsi, ces règles sont une réponse à la question de recherche $\mathcal{Q}2.1$ sur le peuplement à l'échelle de la voie de circulation à partir de données à l'échelle du tronçon.

Cependant, les données réelles de la BDTOPO® et d'OSM présentent des problèmes de qualité concernant le réseau cyclable. Il est difficile de réaliser l'intégralité de l'instanciation de notre BDRM avec ces données de manière individuelle. Le problème de complétude sur des attributs clés comme la largeur et le nombre de voies représente le principal frein à l'emploi de notre BDRM. L'identification de ces problèmes est une réponse à la question de recherche $\mathcal{Q}2.2$ sur la capacité des données existantes à permettre une véritable représentation du réseau cyclable.

Nous avons dans certains cas inféré les données de notre BDRM à partir des données sources comme pour le nombre de voies ou la largeur de certaines infrastructures mais ces inférences ont leurs limites car nous savons que les infrastructures cyclables sont très différentes entre elles. Ces règles méthodologiques répondent à la question de recherche $\mathcal{Q}2.3$,

Nous avons choisi de nous concentrer sur les sources de données consacrée en partie à la route en laissant de côté la question de recherche $\mathcal{Q}2.4$ sur l'ajout de données extérieures (climatiques, trafic etc.).

Au final, les données existantes présentent trop de limitations pour nous permettre de proposer une bonne version de la BDRM. Nous avons aussi vu que l'appariement de la BDTOPO® et d'OSM pourrait mener à une instance avec une meilleure qualité des données. Pour réaliser cela, nous nous attardons sur la qualité

de ces sources de données. La BDTOPO® suivant des normes très contrôlées, nous nous dirigeons vers OSM dans le but de savoir à quel moment nous pouvons utiliser les données d'OSM au lieu de celles de la BDTOPO®. Pour cela, nous souhaitons nous concentrer sur la fraîcheur d'OSM en lien avec les arguments présentés dans le chapitre 3.

# Discussion

Nous avons proposé une définition du réseau cyclable incluant l'ensemble des infrastructures routières où les cyclistes sont autorisés. De plus, nous avons défini les classes d'infrastructures cyclables composant ce réseau. Ces définitions étaient nécessaires pour comprendre la BDRM adaptée aux cyclistes ainsi que les méthodes d'analyse de l'évolution d'OSM.

Ensuite, la BDRM proposée est totalement orientée vers l'usage du cyclisme grâce à ses attributs. Elle est composée d'une partie consacrée aux infrastructures routières, à l'environnement de ces infrastructures et à l'historique des données. Dans ce sens, le chapitre 6 répond à l'ensemble des questions issues de la problématique $\mathcal{P}1$. La BDRM que nous avons créée contient les attributs nécessaires au calcul d'un indicateur de cyclabilité complet reprenant l'ensemble des notions clés de l'état de l'art (cf chapitre 2). Cela répond parfaitement à la question de recherche $\mathcal{Q}1.1$. De plus, le fait de remettre en question la granularité du tronçon de route utilisée dans les BDRM existantes permet à l'ensemble des voies de bénéficier d'une information attributaire ciblée. En effet, l'association entre chaque voie de circulation, chaque sens de circulation et chaque usager permet de représenter chaque usage de la route de la manière la plus fidèle possible. Ce point permet de répondre aux questions de recherche $\mathcal{Q}1.2$ et $\mathcal{Q}1.3$. De plus, cette association permet de représenter tout usage du réseau routier, ce qui rentre totalement dans la problématique de recherche $\mathcal{P}4$.

Ensuite, le chapitre 7 a expliqué la manière dont nous avons instancié un modèle logique de notre BDRM adaptée aux cyclistes avec des sources de données existantes. Nous avons élaboré un ensemble de règles et d'hypothèses qui nous ont permis d'obtenir une instance la plus complète possible. Nous avons commencé par créer les tronçons, puis nous avons calculé leur nombre de voies et les attributs spécifiques à chaque voie. Ce point permet de répondre à la question de recherche $\mathcal{Q}2.1$.

Cependant,, le chapitre 7 met en valeur la difficulté de peupler cette BDRM avec les données existantes. Nous avons testé individuellement le peuplement de cette BDRM avec la BD TOPO®, puis OSM en se concentrant sur la partie linéaire pour cette-dernière. Concernant le passage des tronçons de route aux voies de circulations, il a fallu calculer le réel nombre de voies car les BDRM fournissent le nombre de voies pour les voitures. Cela demande d'ajouter les voies pour les cyclistes et les piétons qui sont souvent stockées dans des attributs. Ensuite, une nouvelle difficulté consiste à localiser ces voies au bon endroit dans le tronçon. Le calcul de la largeur des voies a été laissé de côté à cause de l'absence récurrente de cette information à l'échelle du tronçon. C'est ce point-ci qui nous a amené à conserver les géométries des tronçons sur les voies sans les décaler légèrement. Ensuite, il faut déterminer le sens de circulation correct pour chaque voie. Cela s'est avéré impossible avec la BDTOPO® lorsque le nombre de voies pour les voitures est impair et supérieur ou égal à 3 concernant la voie du milieu. Concernant le peuplement avec OSM, deux problèmes majeurs se posent avec l'utilisation de ces données. D'abord, la

complétude attributaire est très insuffisante pour des attributs majeurs comme le nombre de voies ou la largeur de la route. L'ensemble des problèmes de qualité évoqués pour la BDTOPO® et OSM apportent des éléments de réponse à la question de recherche $\mathcal{Q}2.2$.

Notre BDRM inclue de nombreux attributs y compris certains concernant des données climatiques liées au confort et la sécurité comme le vent. Ces données climatiques représentent un réel enjeu pour les cyclistes car un vent de face ou de dos va grandement influer sur le confort alors qu'un vent de côté peut influer négativement la sécurité d'un cycliste. D'autres facteurs liés à la présence des poids lourds pourraient être calculés à partir de la BDRM. Cependant, le centre de ce manuscrit concerne l'usage cycliste et le peuplement des autres usages n'est pas le centre de cette contribution, bien que cela reste une perspective intéressante. Ces idées et perspectives sont des réponses ainsi que des portes ouvertes pour la question de recherche $\mathcal{Q}2.4$.

Concernant certaines données du modèle, nous avons du les inférer en fonction des données et des spécifications des BDRM utilisées. Par exemple, tout tronçon n'ayant pas de nombre de voies renseigné ne s'est vu ajouter qu'une seule voie. Cette idée nous a amené au fait que la longueur totale de l'ensemble des voies était plus faible que ce à quoi nous nous attendions (environ le double de la longueur des BDRM employées). Ensuite, pour l'usage, il faut lier chaque tronçon avec son équivalent dans le code de la route français afin d'établir les bonnes priorités sur chaque voie. Ces idées permettent de répondre partiellement à la question de recherche $\mathcal{Q}2.4$.

Avec le peuplement de ce modèle, nous sommes aussi arrivé à la conclusion que la BD TOPO® et OSM ont des caractéristiques qui s'assemblent et d'autres en commun. Nous pensons donc qu'un peuplement de notre BDRM adaptée au cyclisme avec une BDRM issue d'un appariement entre la BD TOPO® et OSM serait une meilleure solution que ce que nous avons testé dans ce manuscrit. Cependant, il nous faut traiter la qualité des deux sources de données afin de ne conserver que les bonnes informations concernant chaque tronçon de route. Pour cela, nous souhaitons analyser la fraîcheur du réseau cyclable d'OSM qui est un véritable sujet de recherche contrairement à celle de la BD TOPO® qui se repose sur des campagnes de saisie et les retours de ses partenaires. Or, dans le chapitre 2, nous avons défini l'évolution comme un moyen d'évaluer la fraîcheur. La prochaine partie de ce manuscrit sera donc consacrée à l'analyse de l'évolution du réseau cyclable d'OSM.

Troisième partie

# Évolution du réseau cyclable dans OSM

Cette partie présente nos travaux sur l'évolution du réseau cyclable dans OSM.

Dans le chapitre 7, nous avons instancié notre BDRM adaptée à l'usage du cyclisme mais nous nous sommes confrontés à de nombreux problèmes de qualité (complétude sur la thématique cyclable, cohérence etc.). La BDTOPO® dispose de plusieurs attributs permettant d'estimer sa qualité (PREC_ALTI, PREC_PLANI). Or, la structure d'OSM et la manière dont cette source de données est remplie rendent sa qualité aléatoire. Cela rend une analyse de qualité de cette base de données plus important. L'état de l'art sur les méthodes d'analyse de qualité des données routières sont présentées dans le chapitre 3 et nous concluons que la fraîcheur est très peu analysée dans ce domaine. Cependant, analyser la fraîcheur des données géographiques volontaires est complexe car la seule date de la dernière modification n'est pas suffisante pour estimer la fraîcheur d'un objet. En effet, nous ne savons pas si un contributeur a analysé un objet et conclu qu'il n'y avait aucun changement à apporter à celui-ci. En conclusion de ce raisonnement, nous analysons la fraîcheur du réseau cyclable d'OSM par le prisme de son évolution.

Le chapitre 8 présente les deux méthodes d'analyse de l'évolution du réseau cyclable. Le chapitre 9 présente le paramétrage de ces deux méthodes et les résultats avec des premiers éléments de discussion. Une discussion clôture cette partie en résumant les contributions proposées dans les deux derniers chapitres et proposant des pistes d'amélioration des méthodes d'analyse de l'évolution. Dans une fin de facilité de compréhension, un seul profil cycliste est réalisé en cherchant à définir un profil moyen qui ne favorise pas un des usages présentés dans le chapitre 5.

Chapitre 8

# Analyse de l'évolution d'un réseau

**Sommaire**


**8.1 Graphe multiplexe pour mesurer l'évolution des données OSM . . . 143**
8.1.1 Présentation du graphe multiplexe . . . 144
8.1.2 Similitudes et différences entre la BDRM adaptée et le graphe multiplexe . . . 147
**8.2 Analyse de l'évolution du réseau cyclable par tronçons . . . 148**
8.2.1 Principe général . . . 148
8.2.2 Résultats attendus . . . 149
**8.3 Analyse par itinéraires . . . 150**
8.3.1 Principe général . . . 151
8.3.2 Sorties de l'analyse . . . 153
**8.4 Conclusion . . . 155**


Dans ce chapitre, nous cherchons à trouver une méthode d'analyse du réseau cyclable dans OSM mettant l'accent sur un usage. Cela fait référence à la question de recherche $\mathcal{Q}3.1$ autour de l'analyse de l'évolution du réseau cyclable. Dans ce but, nous avons besoin d'un graphe adapté à ce genre d'analyse. Ce chapitre présente en premier lieu le graphe multiplexe sur lequel les analyses de l'évolution reposent. En deuxième lieu, nous introduisons deux méthodes complémentaires d'analyse de l'évolution du réseau cyclable au cours du temps qui s'appuient sur ce graphe multiplexe. Il s'agit d'une analyse par tronçons de route et une analyse par itinéraires. Ces travaux ont fait l'objet d'un article publié à AGILE 2023 [Bres *et al.* 2023] et d'un article en cours de révision pour JOSIS [Bres *et al.* 2024]. Dans les deux chapitres suivants, nous faisons correspondre les termes *jeux de données* et *snapshot*.

## 8.1 Graphe multiplexe pour mesurer l'évolution des données OSM

En accord avec nos conclusions du chapitre 4, nous utilisons un graphe multiplexe afin de représenter les évolutions du réseau cyclable. La première sous-section présente le graphe et son fonctionnement. La deuxième sous-section lie ce graphe avec le modèle conceptuel présenté dans le chapitre 6.

### 8.1.1 Présentation du graphe multiplexe

Soit $G$ notre graphe multiplexe orienté pondéré tel que $G = \{V, E\}$ avec E l'ensemble des arcs et V l'ensemble des nœuds. Nous choisissons ici de simplifier les évolutions d'OSM en les agrégeant par snapshots, au lieu de considérer chaque changement de manière individuelle. Chaque couche de notre graphe représente donc un jeu de données d'OSM et toutes les couches implémentées dans ce graphe sont connectées. Cette analyse se différencie de celle consistant à implémenter un fichier d'historique des modifications d'OSM dans un graphe comme dans [Novack *et al.* 2022]. Les snapshots sont identifiés avec le paramètre $n$ qui représente le temps. Nos méthodes d'analyse de l'évolution sont centrées sur les tronçons de routes et n'incluent pas les intersections. Cela explique notre besoin d'avoir de nombreux attributs principalement sur les arcs et pas sur les nœuds.

Soit $G^n = (V^n, E^n)$. $G^n$ est une couche du graphe représentant un snapshot à un instant $n$. $E^n$ est l'ensemble de tous les arcs de la couche à l'instant $n$ tel que $E^n \subseteq E$. Un arc dans le graphe est un tronçon de route dans le monde réel où ses caractéristiques sont identiques en tout point (nombre de voies, limitation de vitesse etc.). L'équation 8.1 présente la composition de $E^n$.

$$E^n = \{e_0^m, e_1^m, ..., e_i^m, e_k^m\} \tag{8.1}$$

Dans l'équation 8.1, $e_i^m$ représente un arc avec le numéro de version m pour la couche à l'instant $n$. k est le nombre d'arcs du jeu de données à l'instant $n$.

$V^n$ est l'ensemble des nœuds de la couche du graphe à l'instant $n$ tel que $V^n \subseteq V$. Un nœud dans le graphe représente dans le monde réel soit une intersection soit un changement dans les caractéristiques de la route (e.g. passage de deux à trois voies). L'équation 8.2 présente la composition de $V^n$.

$$V^n = \{v_0^m, v_1^m, ..., v_j^m, v_l^m\} \tag{8.2}$$

Dans l'équation 8.2, $v_j^m$ représente un nœud avec le numéro de version m pour la couche à l'instant $n$. A partir des deux dernières équations, l'équation 8.3 présente la composition d'une couche $G^n$ du graphe multiplexe.

$$G^n = (\{v_1^m, v_2^m, ..., v_j^m, ..., v_l^m\}, \{e_1^m, e_2^m, ..., e_i^m, ..., e_k^m\}) \tag{8.3}$$

L'équation détaille $E^n$ et $V^n$, les éléments composant $G^n$, une couche de notre graphe multiplexe. De plus, l'union de l'ensemble des $G^n$ crée le graphe multiplexe complet $G$. L'union de l'ensemble des $E^n$ et des $V^n$ créent respectivement l'ensemble de tous les arcs $E$ et de tous les nœuds $V$ tel que $G = \{\cup V^n, \cup E^n\}$. Chaque objet (nœud ou arc) identique dans plusieurs snapshots consécutifs est utilisé dans l'ensemble des couches où il est présent. Cela signifie que ces objets ne sont créés qu'une seule fois pour l'ensemble du graphe au lieu d'avoir plusieurs instances identiques.

En ce qui concerne les arcs, ils représentent les ways dans OSM disposant du tag *highway* et où les cyclistes sont autorisés. Chaque arc a une géométrie linéaire, un identifiant (id), un numéro de version (version) pour aider à suivre leur évolution,

l'identifiant de la *way* OSM dans la base de données d'origine (osmid) et son numéro de version dans OSM (osmversion) qui servent à lier une *way* d'OSM et un arc du graphe, une classe d'infrastructure cyclable, reposant sur la classification proposée dans le chapitre 5, et un attribut regroupant l'ensemble des tags OSM d'une *way* pour suivre ses changements attributaires.

En ce qui concerne les nœuds dans $V$, ils représentent les nodes dans OSM. Chaque $v_i^m$ dispose d'un identifiant (*id*), d'un numéro de version (*version*), de son identifiant OSM (*osmid*), de son numéro de version dans OSM (*osmversion*) et d'une géométrie ponctuelle (*geom*). Les nœuds n'étant pas l'objet d'étude des futures analyses de l'évolution, nous n'ajoutons aucun attribut lié à l'usage cycliste ici.

Chaque arc est délimité par deux nœuds. La relation entre un arc et ses nœuds est expliquée dans l'équation 8.4.

$$e_i^m = \overrightarrow{v_j, v_{j'}} \tag{8.4}$$

La graphe est partiellement basé sur OSM pour son versionnement. Afin de bien le comprendre et de mettre en valeur les différences par rapport à celui d'OSM, nous détaillons la gestion des arcs du graphe lors de mises à jour ici.

Le premier cas se présente lorsqu'une *way* d'OSM n'a pas été modifiée entre deux snapshots consécutifs, qu'il s'agisse de sa géométrie ou de ses attributs. L'arc correspondant est directement employé dans les deux couches concernées.

Le deuxième cas se présente lorsqu'une une *way* d'OSM a un changement géométrique. Dans OSM il y a deux types de changements géométriques sur les ways : un changement de géométrie d'un *node* et un changement dans la composition de *nodes* d'une *way*. Un changement de géométrie d'un *node* signifie qu'un *node* composant une *way* a un changement de géométrie, impactant les *ways* utilisant ce *node*. Dans OSM, le changement géométrique ne sera visible que sur le *node*. Or, dans notre graphe, le changement géométrique sera visible à la fois sur le nœud mais aussi sur l'ensemble des arcs utilisant ce nœud. Un changement de composition de *node* signifie qu'une *way* d'OSM a un changement dans la liste des *nodes* qui la compose. Cela peut être un ajout, une suppression ou un changement sur un ou plusieurs *nodes*. Dans notre graphe, nous nous alignons sur OSM où uniquement la *way* est mise à jour.

Le troisième cas se présente lorsqu'un objet d'OSM (*node* ou *way*) a subi plusieurs changements entre deux snapshots consécutifs. Dans notre graphe, nous regroupons l'ensemble des changements opérés sur un objet et le numéro de version dans notre graphe n'est incrémenté que par 1. De même, si un objet OSM (*node* ou *way*) est créé puis modifié entre deux snapshots consécutifs, son premier numéro de version sera quand même le 1. Dans la même logique, si un objet OSM (*node* ou *way*) est mis à jour puis supprimé entre deux snapshots consécutifs, nous ne créons pas de version finale pour l'objet concerné. Ce cas nous amène au cas ambiguë où un objet (*node* ou *way*) a été modifié au moins deux fois entre deux snapshots consécutifs mais les versions sont identiques (dans le cadre d'une guerre d'édition [Mooney & Corcoran 2014] ou d'un acte de carto-vandalisme [Truong 2020]). Une

nouvelle version de l'objet est ici créée pour signaler qu'un changement a eu lieu.

La figure 8.1 montre un exemple de fonctionnement du graphe. Pour un gain de lisibilité, il utilise les familles d'infrastructures introduites dans le chapitre 5 qui représentent l'usager prioritaire de chaque route. Plusieurs fonctions sont implémentées pour faciliter l'accès aux attributs des arcs :

— La fonction $g(e_i^m)$ qui renvoie la géométrie $e_i^m.g$.
— La fonction $t(e_i^m)$ qui renvoie les tags OSM $e_i^m.t$ de l'objet (nœud ou arc).
— La fonction $c(e_i^m)$ qui renvoie la classe d'infrastructure cyclable $e_i^m.c$.
— La fonction $l(e_i^m)$ qui renvoie la longueur du tronçon $e_i^m.l$.

L'ensemble de ces fonctions est utilisable pour les nœuds sauf la longueur.

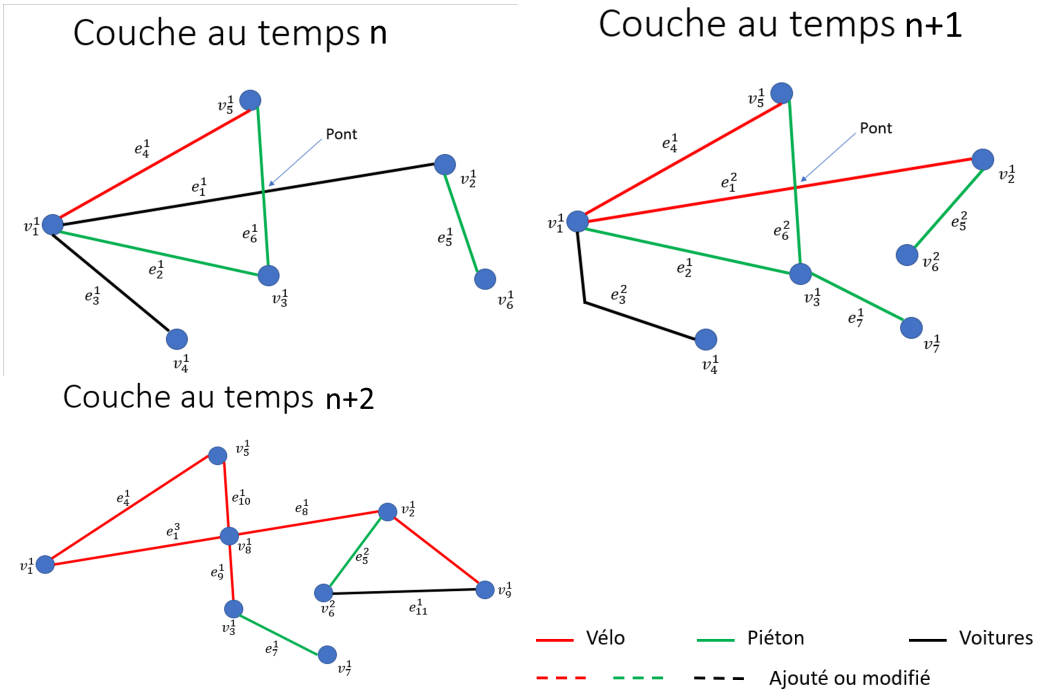



FIGURE 8.1 – Exemple d'utilisation du graphe avec 3 couches (issu de [Bres *et al.* 2024])

La première couche à l'instant $n$ est composée de $V^n = \{v_1^1, v_2^1, v_3^1, v_4^1, v_5^1, v_6^1\}$ et $E^n = \{e_1^1, e_2^1, e_3^1, e_4^1, e_5^1, e_6^1\}$.

Maintenant que la couche à l'instant $n$ du graphe est expliquée, supposons que plusieurs changements ont eu lieu entre cette couche et celle à l'instant $n+1$, amenant la couche n+1.

— Le nœud $v_7^1$ et l'arc $e_7^1$ sont créés.
— Le nœud $v_6^1$ a un changement de géométrie. Ce changement impacte aussi la géométrie de l'arc $e_5^1$. Le nœud $v_6^1$ est devenu $v_6^2$ et l'arc $e_5^1$ est devenu $e_5^2$.
— L'arc $e_1^1$ ayant un changement de famille d'infrastructure, il est devenu $e_1^2$.
— L'arc $e_3^1$ a un changement géométrique sans modifier la géométrie des nœuds à ses extrémités. $e_3^1$ est devenu $e_3^2$.

— L'arc $e_6^1$ a un changement attributaire qui ne modifie pas sa famille d'infrastructure cyclable. $e_6^1$ est devenu $e_6^2$.

Ces changements sont formalisés dans les équations 8.5 et 8.6.

$$V^{n+1} = V^n \cup \{v_7^1, v_6^2\} - \{v_6^1\} \tag{8.5}$$

$$E^{n+1} = E^n \cup \{e_7^1, e_1^2, e_3^2, e_5^2, e_6^2\} - \{e_1^1, e_3^1, e_5^1, e_6^1\} \tag{8.6}$$

Supposons maintenant un troisième instant $n$+2 et que nouveaux changements ont eu lieu entre la couche à l'instant $n$+1 et celle à t+2.

— Un pont a été détruit et transformé en intersection entre les arcs de la couche n+1 $e_1^2$ et $e_5^2$. Le nœud résultant de ce changement dans la couche n+2 est $v_8^1$.

— Création de deux arcs $e_9^1$ et $e_{10}^1$ pour remplacer l'arc $e_6^2$. Les deux arcs ont aussi un changement de famille d'infrastructure par rapport à l'arc $e_6^2$ de la couche n+1.

— Création de $e_8^1$ changement géométrique de $e_1^2$ pour intégrer la nouvelle intersection ($v_8^1$). $e_1^2$ est devenu $e_1^3$.

— Création du nœud $v_9^1$ et de l'arc $e_1 1^1$.

— Suppression de l'arc $e_3^2$ et du nœud $v_4^1$.

Ces changements sont formalisés dans les équations 8.7 et 8.8.

$$V^{n+2} = V^{n+1} \cup \{v_8^1, v_9^1\} - \{v_4^1\} \tag{8.7}$$

$$E^{n+2} = E^{n+1} \cup \{e_8^1, e_9^1, e_{10}^1, e_{11}^1, e_1^3\} - \{e_2^1, e_3^2, e_6^2, e_1^2\} \tag{8.8}$$

Après avoir défini l'ensemble des couches composant le graphe multiplexe, les équations 8.9 et 8.10 définissent respectivement V et E à travers l'ensemble du graphe.

$$V = V^n \cup V^{n+1} \cup V^{n+2} = \{v_1^1, v_2^1, v_3^1, v_4^1, v_5^1, v_6^1, v_6^2, v_7^1, v_8^1, v_9^1\} \tag{8.9}$$

$$E = E^n \cup E^{n+1} \cup E^{n+2} = \{e_1^1, e_1^2, e_1^3, e_2^1, e_3^1, e_3^2, e_4^1, e_5^1, e_5^2, e_6^1, e_6^2, e_7^1, e_8^1, e_9^1, e_{10}^1, e_{11}^1\} \tag{8.10}$$

Ainsi, ce graphe permet de représenter les évolutions de manière plus efficace par rapport au modèle conceptuel présenté dans le chapitre 6. En effet, dans le modèle conceptuel, plusieurs classes étaient nécessaires pour représenter l'ensemble des évolutions. La prochaine sous-section présente en détails les liens entre le modèle conceptuel et le graphe multiplexe.

### 8.1.2 Similitudes et différences entre la BDRM adaptée et le graphe multiplexe

Nous présentons ici comment le graphe multiplexe permet de mieux représenter les évolutions du réseau cyclable par rapport au modèle conceptuel. L'ensemble des changements du graphe reprend les classes *creationObjet*, *suppressionObjet* et

*changementAttribut*. Les classes d'infrastructures cyclables utilisées dans les deux modélisations sont identiques et basées sur le chapitre 5.

Le graphe multiplexe, dans l'optique de rester proche des données OSM de base reste à l'échelle du tronçon de route, contrairement à notre modèle conceptuel du réseau de mobilité, qui est à l'échelle de la voie de circulation. De plus, nous ne disposons pas toujours des informations pour peupler un tel modèle. L'ensemble des tags OSM sont conservés dans le graphe multiplexe, ce qui n'est pas le cas pour le modèle conceptuel. Ce dernier utilise les principaux tags OSM des objets (nœuds ou arcs) afin de calculer ses propres attributs, ce qui implique que la modification d'attributs dans OSM peut ne pas influer sur la représentation d'un objet dans le modèle mais influera obligatoirement sur le graphe. Cependant, tous les changements présents dans la classe *changementAttribut* du modèle conceptuel sont présents dans le graphe multiplexe.

Pour conclure, bien que le graphe multiplexe soit un outil plus fidèle à la réalité d'OSM et permette de mieux représenter les évolutions de cette base de données, il partage de nombreux points communs avec le modèle conceptuel.

Une fois le graphe multiplexe instancié avec les snapshots d'OSM récupérés sur Geofabrik, nous proposons deux analyses de l'évolution du réseau cyclables reposant sur ce graphe.

## 8.2 Analyse de l'évolution du réseau cyclable par tronçons

Cette section présente l'analyse par tronçons de route avec une première sous-section détaillant le principe général et une seconde sous-section détaillant les différents résultats proposés. Cette analyse est présentée dans un article en cours de publication. La figure 8.2 schématise l'idée de cette analyse.

### 8.2.1 Principe général

L'analyse par tronçons de route consiste à analyser de manière quantitative l'évolution du réseau cyclable à l'échelle de chaque tronçon de route. Les tronçons de route sont représentés par les arcs du graphe multiplexe présenté en section 8.1. Dans cette analyse, chaque tronçon est considéré de manière individuelle en regardant l'évolution de ses caractéristiques. Cette analyse est dite exhaustive car l'ensemble des tronçons de route de la zone d'étude sont pris en compte. Cette analyse est très démocratisée pour l'analyse de réseau sur une grande zone d'étude [Girres & Touya 2010, Sehra *et al.* 2017].

Nous considérons les quantités (exprimées en km) de tronçons de routes ajoutés, supprimés, mis à jour et non modifiés entre deux instants consécutifs. Nous distinguons trois différents types de mises à jour qui sont : sémantique, thématique et géométrique. Les mises à jour sémantiques sont des changements dans les propriétés d'un tronçon de route qui vont faire changer son type d'infrastructure cyclable selon

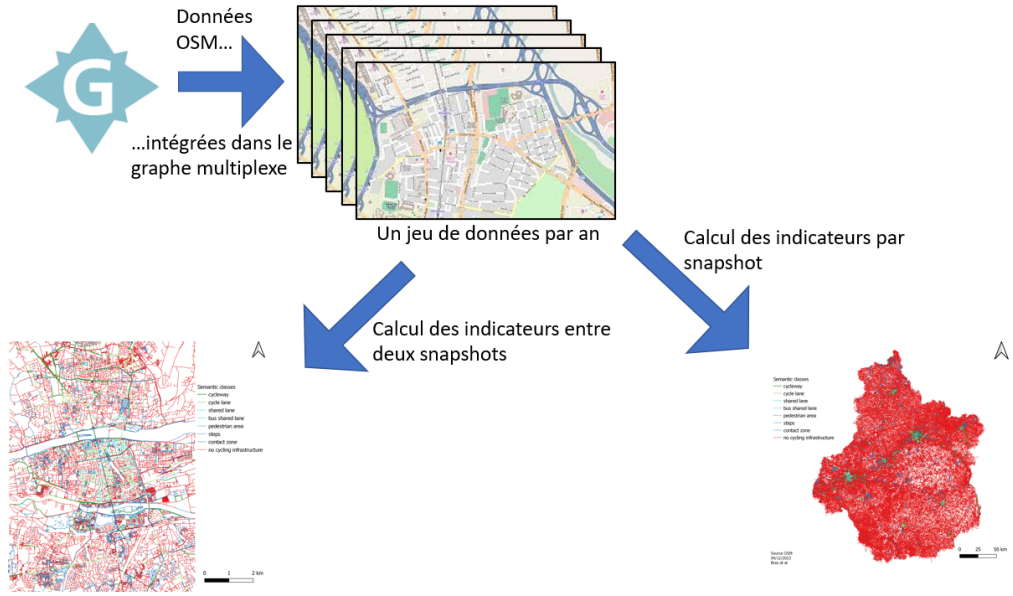



FIGURE 8.2 – Fonctionnement de l'analyse d'évolution du réseau cyclable par tronçons de route

les classes définies dans la section 5.1. Les mises à jour thématiques représentent n'importe quel autre changement de tag sur un tronçon. Les mises à jour sémantiques sont donc un sous-ensemble des mises à jour thématiques. Les mises à jour géométriques représentent les changements de géométrie d'un tronçon.

### 8.2.2 Résultats attendus

Cette sous section présente les sorties de l'analyse par tronçons de route qui sont divisées en deux sections : les résultats par snapshots individuellement et les résultats par comparaison de deux snapshots consécutifs.

**Résultats sur un jeu de données** La première sortie de cette analyse est un tableau donnant la longueur en kilomètres de la portion du réseau appartenant à chaque famille d'infrastructures cyclables. Ce tableau permet de se rendre compte de la composition du réseau de l'ensemble de la zone d'étude. La classification en trois groupes est utilisée ici pour plus de clarté. La représentation des données de ce tableau est proposée dans l'équation 8.11.

$$L^n_{sem} = \sum_{i=1}^{m} d(E^n_i \subset \{S(E^n_i) = sem\}) \tag{8.11}$$

Dans l'équation 8.11, *sem* représente la classe d'infrastructure cyclable, n se rapporte à un instant donné et par conséquence au jeu de données associé, i est l'indice représentant un arc du graphe, S est la fonction appelant la classe d'infrastructure cyclable d'un arc, d est la fonction appelant la longueur d'un arc. Le L représente la

longueur totale pour un jeu de données à l'instant $n$ pour la classe d'infrastructure cyclable sem. m se rapporte au nombre total d'arcs. Les tableaux obtenus sont accompagnés de cartes qui permettent une visualisation spatiale des données étudiées. Ces cartes peuvent servir de support pour le choix des zones d'intérêts de l'analyse par itinéraires car elles permettent de visualiser des disparités dans la densité et la proportion de routes de différentes classes d'infrastructures dans la zone d'étude.

**Résultats d'évolution** En plus des indicateurs à un instant $n$, le tableau de sortie contient le pourcentage d'augmentation de chaque classe sémantique par rapport au précédent jeu de données.

Un tableau contient la longueur en kilomètres et le pourcentage pour les tronçons ajoutés à l'année n+1, supprimés à l'année n+1, mis à jour entre l'année n et n+1 et non modifiés entre l'année n et n+1 par rapport à l'union de la longueur totale du réseau à l'année n et à l'année n+1. Ce tableau est illustré par des cartes réalisant des zooms dans des zones regroupant plusieurs catégories de changements.

Nous calculons également un tableau spécifique pour les mises à jour. Il fournit la longueur en kilomètres et le pourcentage par rapport à la longueur totale des tronçons mis à jour entre l'année n et n+1 des tronçons ayant subi des mises à jour géométriques, sémantiques et thématiques. Ces mises à jour sont expliquées dans la section 8.1.1. Un même tronçon peut être compté dans plusieurs types de mises à jour donc il est normal que le total par ligne de ce tableau soit supérieur à 100%.

Les matrices de transition entre deux snapshots consécutifs sont aussi calculées avec les classes d'infrastructures cyclables sauf pour les voies partagées car les voies de bus avaient une longueur totale quasiment nulle (les voies de bus sont souvent attribuées à un tronçon de route pour la circulation routière et sont rarement un tronçon séparé de toute autre voie de circulation). Les tronçons ajoutés et supprimés sont également pris en compte dans ces matrices de transition. L'équation 8.12 présente la manière de calculer une case de la matrice de transition.

$$L^{n,n+1}_{sem,sem2} = \sum d(E_i^{n+1} \subset \{S(E_i^n) = sem \cap S(E_i^{n+1}) = sem2\}) \tag{8.12}$$

Dans l'équation 8.12, n et n+1 représentent deux snapshots consécutifs dans l'ordre chronologique, *sem* est la classe d'infrastructure cyclable du tronçon à l'instant $n$ et *sem2* est la classe d'infrastructure cyclable du tronçon à l'instant $n$+1, i est l'indice représentant un arc du graphe, S est la fonction appelant la classe sémantique d'un arc, d est la fonction appelant la longueur d'un arc. L signifie la longueur totale des tronçons de route ayant la classe d'infrastructure cyclable sem au temps n et la classe sem2 au temps n+1.

## 8.3 Analyse par itinéraires

L'analyse par itinéraires est une adaptation de la méthode développée par [Schmidl *et al.* 2021] pour le cyclisme. Cette méthode a été présentée dans

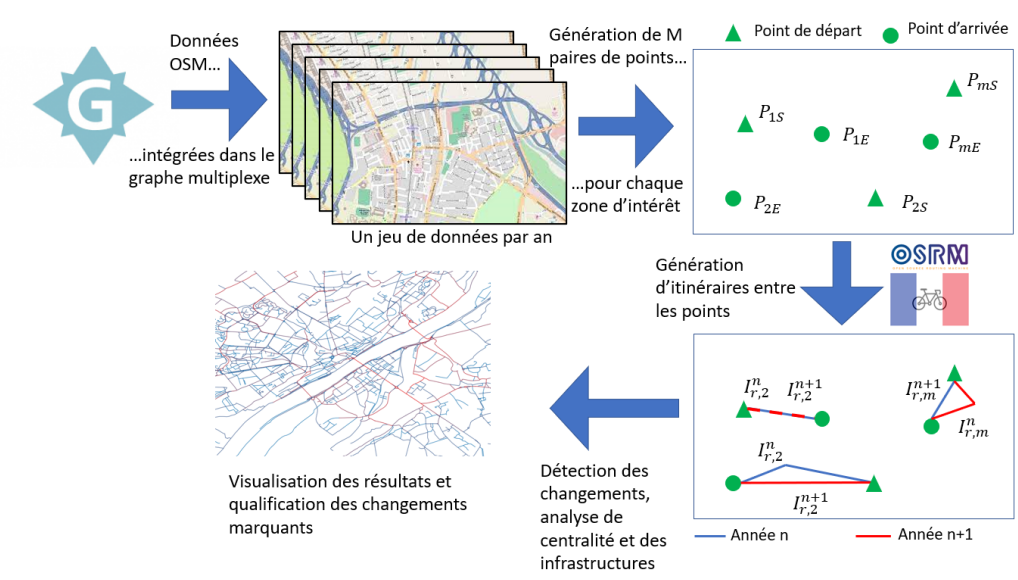



FIGURE 8.3 – Fonctionnement de l'analyse par itinéraires

[Bres *et al.* 2023, Bres *et al.* 2024]. La figure 8.3 présente le fonctionnement de l'analyse par itinéraires en incluant le graphe multiplexe.

La première sous-section présente le principe général de la méthode. La seconde sous-section présente les sorties de la méthode.

### 8.3.1 Principe général

L'analyse par itinéraires consiste à analyser quantitativement l'évolution des usages simulés du réseau cyclable par les cyclistes. Les usages simulés consistent à calculer des itinéraires optimaux pour un ensemble de couples origine-destination générés aléatoirement et à analyser l'évolution de ces itinéraires au cours du temps selon une granularité temporelle donnée.

Dans cette analyse, chaque itinéraire pour chaque couple origine-destination est analysé individuellement en tenant compte de ses caractéristiques géométriques et de la composition de ses tronçons supports dans OSM. Les itinéraires sont simulés dans six zones d'intérêt considérées comme diversifiées en terme de densité de population. Nous avons choisi les deux plus grandes villes de la région (Tours et Orléans) ainsi que deux villes de taille moyenne à l'échelle de la région (Blois et Bourges) et deux zones rurales (plaine de la Beauce et forêt de Sologne).

Cette analyse par itinéraires est dite non-exhaustive puisqu'elle ne va s'intéresser qu'aux tronçons composant les itinéraires générés au cours du temps. Ces tronçons sont censés être ceux que les cyclistes privilégient pour se déplacer. Le script de génération d'itinéraires est expliqué par l'algorithme 8.1. La valeur de $d$ renseignée dans cet algorithme est expliquée dans la section 9.1.

Pour obtenir un itinéraire, le point de départ (algorithme 8.1, ligne 3) est généré dans une zone d'intérêt puis le point d'arrivée (algorithme 8.1, ligne 4) est créé dans

**Algorithme 8.1** Algorithme de génération d'un itinéraire

$d \leftarrow 100$ ▷ Distance au réseau
$yearmin \leftarrow 2014$ ▷ Année du 1er snapshot
$yearmax \leftarrow 2022$ ▷ Année du dernier snapshot
**répéter**
    $pStart \leftarrow$ FIND_START$(d, bbox)$
    $pEnd \leftarrow$ FIND_END$(d, start, bbox)$
    $iti \leftarrow$ GET_ROUTE$(pDepart, pFin, yearmin)$
    $nb \leftarrow 0$
    **pour** $y \leftarrow yearmin + 1, yearmax + 1$ **faire**
        **si** GET_ROUTE(pStart,pEnd,y)[coords][0] != iti[coords][0] ou GET_ROUTE(pStart,pEnd,y)[coords][-1] != iti[coords][-1] **alors**
            $nb++$
        **fin si**
    **fin pour**
**jusqu'à** $nb == 0$
**fonction** FIND_START$(dist,bbox)$ ▷ Retourne un point de départ.
    **répéter**
        $point \leftarrow [random(bbox[0][0], bbox[1][0]), alea(bbox[0][1], bbox[1][1])]$
        $d \leftarrow distance(point, network)$
    **jusqu'à** $d \leq dist$
    **retourne** $point,d$
**fin fonction**
**fonction** FIND_END$(dist,start,bbox)$ ▷ Retourne un point d'arrivée.
    **répéter**
        $point \leftarrow [start[0] + x, start[1] + y]$
        $d \leftarrow distance(point, network)$ *et* $d \leq dist$
    **jusqu'à** $point[0] \geq bbox[0][0]$ *et* $point[0] \leq bbox[1][0]$ *et* $point[1] \geq bbox[0][1]$ *et* $point[1] \leq bbox[1][1]$
    **retourne** $point,d$
**fin fonction**
**fonction** GET_ROUTE$(start_point,end_point,year)$ ▷ Retourne un itinéraire optimal.
    **retourne** $geometry, coords, distance, duration$
**fin fonction**

la même zone d'intérêt dans un rayon fixé. Les couples origine destination sont identiques à tout moment de l'expérience (algorithme 8.1, ligne 8). Seuls les itinéraires entre ces couples sont susceptibles d'évoluer. Ensuite, l'ensemble des itinéraires est généré pour vérifier que les itinéraires respectent bien les critères de distance et de durée (algorithme 8.1, ligne 22). Contrôler la durée des itinéraires permet également de s'assurer de leur cohérence. Par exemple, un itinéraire avec une durée supérieure à trois heures est considéré comme un problème étant donné que peu de personnes sont capables de le réaliser. Le même procédé est employé pour des itinéraires de moins d'une minute. Pour résoudre ces problèmes, l'algorithme 8.1, à la ligne 22, inclue des valeurs x et y qui modifient les coordonnées du point de départ pour obtenir un point d'arrivée. Nous commençons par déterminer dans quelle direction le point d'arrivée va être déplacé puis nous définissons x et y dans un intervalle suffisamment proche et éloigné du point de départ pour obtenir un itinéraire avec une longueur cohérente.

La prochaine sous-section explique les différents résultats de l'analyse que nous venons de détailler.

### 8.3.2 Sorties de l'analyse

L'analyse propose une première série de résultats sur l'évolution des itinéraires portant sur la longueur et le temps de parcours. Ensuite, un indicateur de centralité à l'échelle du tronçon de route est calculé. Pour finir, nous quantifions l'usage des infrastructures cyclables dans chaque itinéraire pour proposer des indicateurs agrégés à l'échelle de la zone d'intérêt et du jeu de données.

**Évolution des itinéraires** Nous commençons par une analyse de la longueur des itinéraires. La longueur des itinéraires est comparée entre deux snapshots à des instants n et n+1. Cependant, la longueur de manière brute ne peut pas être utilisée comme indicateur étant donné que les différents itinéraires auront des longueurs très variables. Nous retenons donc comme indicateur, le taux d'évolution de la longueur d'un même itinéraire entre deux snapshots consécutifs comme présenté dans l'équation 8.13.

$$evoLong(I_{r,m}^{n+1}) = \frac{d(E(I_{r,m}^{n+1})) - d(E(I_{r,m}^{n}))}{d(E(I_{r,m}^{n+1}))} \tag{8.13}$$

Dans l'équation 8.13, n et n+1 représentent respectivement le jeu de données à un instant $n$ et n+1, r représente la zone d'intérêt, m représente l'identifiant de l'itinéraire, $E(I_{r,m}^{n})$ représente l'ensemble des arcs composant l'itinéraire $I_{r,m}^{n}$.

A partir de cet indicateur, un graphique en boite à moustache pour chaque zone d'intérêt et pour chaque année est fourni ainsi qu'un tableau donnant le nombre de changements de longueur d'itinéraire d'au moins 1% et d'au moins 20%. Le premier seuil est censé représenter des changements mineurs car les itinéraires sont très courts.

Un changement de moins de 100m dans la longueur d'un itinéraire suffit à incrémenter cet indicateur. Cependant, une amélioration de la géométrie d'un tronçon ou l'ajout de mobilier urbain (carrefour transformé en rond-point, chicane) n'est pas censé impacter cet indicateur. Pour le second seuil, nous recherchons des changements majeurs dans l'itinéraire et nous considérons 20% comme un seuil significatif. Ces deux seuils ont été choisis sans consulter les données, pour détecter des changements mineurs et majeurs.

En plus de cet indicateur, nous présentons un tableau expliquant l'évolution du nombre de tronçons de route inclus dans l'analyse par itinéraire par zone d'intérêt et par année. Cet indicateur prend en compte le nombre de tronçons étant empruntés par au moins un itinéraire pour une zone d'étude donnée et une année donnée.

**Indicateur de centralité** Afin de quantifier l'importance de chaque tronçon de route, un indicateur de centralité à l'échelle du tronçon de route est calculé. Pour un tronçon et un jeu de données à un instant donné, l'indicateur compte le nombre d'itinéraires empruntant chaque tronçon de route. Cet indicateur se doit d'être élevé pour les tronçons de route disposant d'une infrastructure cyclable et plus faible pour des tronçons plus directs mais moins adaptés à la pratique du cyclisme. Nous espérons aussi voir cet indicateur augmenter au fil du temps pour les infrastructures cyclables car celles-ci se développent rapidement tout comme leur qualité à l'usage. La centralité du tronçon est calculée en combinant les deux sens de circulation. L'équation 8.14 explique la formule proposée pour le calcul de la centralité.

$$cent(E_r^n) = \#\{I_{r,m}^n \mid E_r^n \in E(I_{r,m}^n)\} \tag{8.14}$$

Dans l'équation (8.14), $n$ représente le jeu de données, $r$ représente la zone d'intérêt, $m$ représente l'identifiant de l'itinéraire, $E(I_{r,m}^n)$ représente l'ensemble des arcs inclus dans l'itinéraire $I_{r,m}^n$. Le signe $\#$ représente la relation de cardinalité.

Cet indicateur à l'échelle d'un tronçon de route pour un jeu de données compte le nombre d'itinéraires empruntant ce tronçon. Nous considérons qu'un itinéraire ne peut emprunter un tronçon qu'une seule fois, quel que soit le sens.

**Usage des infrastructures cyclables** Pour chaque itinéraire, nous savons quel pourcentage de longueur appartient à chaque classe sémantique (5.1), ce qui permet de quantifier l'évolution de l'utilisation de chacune d'entre elles. Cependant, nous nous focalisons sur deux catégories : les pistes cyclables et les infrastructures cyclables. Les pistes cyclables représentent les infrastructures les plus sécurisées en étant totalement séparées de la circulation automobile. Les infrastructures cyclables sont les infrastructures laissant de la place au cycliste mais où il doit partager la place avec un autre usager ; ce sont des infrastructures moins favorables à la mobilité cyclistes que les pistes cyclables, mais plus favorables que les tronçons sans infrastructure cyclable. Nous incluons ici les bandes cyclables, les voies partagées avec les bus et celles avec les voitures. Nous laissons de côté les voies partagées avec

les piétons car la vitesse d'un cycliste y est drastiquement réduite (4km/h). Les indicateurs retenus sont :

— le nombre d'itinéraires empruntant au moins une piste cyclable
— le nombre d'itinéraires empruntant au moins une infrastructure cyclable
— le nombre d'itinéraires empruntant au moins 30% de pistes cyclables
— le nombre d'itinéraires empruntant au moins 30% d'infrastructures cyclables

Le fait de compter les itinéraires empruntant au moins une piste/infrastructure cyclable permet de quantifier la présence sur toute une zone d'intérêt de ces infrastructures. Le seuil de 30%, qui a été choisi arbitrairement, donne une idée de la qualité du réseau des infrastructures cyclables qui est très morcelé en France mais se développe rapidement. L'équation 8.15 donne le détail de calcul pour l'indicateur de l'usage des pistes cyclables.

$$nbSup_x^{N_pc}(E_r^n) = \#\left\{ I_{r,m}^n \mid \left( \sum d(E(I_{r,m}^n)) \subset \{S(E_i^n) = "Piste"\} \right) \geq \frac{d(E(I_{r,m}^n)) * x}{100} \right\} \quad (8.15)$$

Dans l'équation 8.15, $x$ représente le pourcentage minimal souhaité de pistes cyclables, $n$ représente le jeu de données, $r$ représente la zone d'intérêt, $m$ représente l'identifiant de l'itinéraire, $E(I_{r,m}^n)$ représente l'ensemble des arcs inclus dans l'itinéraire $I_{r,m}^n$, $S$ représente la fonction appelant la classe sémantique d'un arc, $d(E(I_{r,m}^n))$ représente la fonction appelant la longueur de l'ensemble des arcs d'un itinéraire et $N_pc$ représente la classe d'infrastructures cyclables définies dans le chapitre 5. Il peut être remplacé par $N_c$ où l'ensemble des infrastructures cyclables sont prises en compte.

La quantité de pistes cyclables et infrastructures cyclables ayant augmenté pendant la période d'étude, on s'attend à ce que ces indicateurs augmentent durant l'ensemble de la période d'étude sur l'ensemble des zones d'intérêts. Cependant, nous pensons que la quantité de pistes cyclables ne sera pas élevée dans les deux zones rurales car il y en a très peu en Beauce et elles représentent des détours conséquents en Sologne.

**Analyse qualitative** Pour compléter et approfondir les résultats de l'analyse par itinéraires, nous réalisons une analyse plus fine de ces résultats. L'objectif est de trouver des changements dans OSM ayant eu un impact fort sur nos résultats et de les qualifier en tant que mise à jour ou mise à niveau.

Nous rappelons qu'une mise à jour est un changement récent dans le monde réel qui a été rapidement répercuté dans une base de données. Ces changements sont nécessaires pour maintenir la meilleure fraîcheur possible.

Nous rappelons qu'une mise à niveau est un problème de qualité dans la base de données qui a été corrigé. Le problème de qualité peut être issu de n'importe quelle dimension mis à part la fraîcheur. Le but serait de ne plus avoir de mises à niveau requises dans OSM.

Qualifier ces changements et mesurer la proportion de mises à niveau par rapport au flux des mises à jour permettrait d'évaluer la fraîcheur des données dans une zone sur une période donnée. De plus, une surveillance accrue des données permettrait de prévoir d'éventuelles mises à niveau futures car si une zone d'intérêt n'a pas assez de mises à jour dans un intervalle de temps donné, il y a de fortes chances que des changements du monde réel ne soient pas répercutés dans OSM.

## 8.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons proposé deux méthodes complémentaires pour analyser l'évolution d'un réseau de mobilité à partir des données d'OSM, en adoptant la perspective d'un utilisateur, à savoir le cycliste. Cette perspective est donnée par les classes sémantiques qui peuvent être modifiées dans le cadre de la reproduction de ces travaux à un autre moyen de transport. L'analyse

par tronçons de route propose deux types de résultats avec des sorties par snapshots et des sorties pour l'évolution entre deux snapshots consécutifs. L'analyse par itinéraires, inspirée des travaux de [Schmidl *et al.* 2021], permet de représenter de manière plus claire les usages théoriques d'un réseau ainsi que leurs évolutions.

Les deux analyses ont un lien fort pour plusieurs raisons. D'abord, les zones d'intérêt de l'analyse par itinéraires ont été définies à l'aide des cartes de la méthode par tronçons de route. En effet, ces cartes mettent en évidence des zones avec des caractéristiques distinctes. Les villes sont clairement identifiables grâce aux infrastructures piétonnes et cyclables quand les zones rurales sont représentées majoritairement par des routes pour les véhicules à moteurs. De plus, le calcul des classes d'infrastructures (chapitre 5) apporté dans le cadre de l'analyse par tronçons de route est réutilisable pour l'analyse par itinéraires. Ces classes permettent de proposer des résultats sur l'utilisation des infrastructures routières par les itinéraires générés.

Le prochain chapitre présente la mise en oeuvre des deux méthodes et expose les résultats obtenus.

Chapitre 9

# Expérimentation sur la région Centre Val-de-Loire

## Sommaire


**9.1 Paramétrage . . . . . 157**
9.1.1 Snapshots . . . . . 157
9.1.2 Profil cycliste dans l'outil de traçage d'itinéraire . . . . . 158
9.1.3 Définition de seuils . . . . . 159
**9.2 Résultats . . . . . 160**
9.2.1 Approche par tronçon de route . . . . . 160
9.2.2 Approche par itinéraires . . . . . 164
**9.3 Conclusion . . . . . 171**


Ce chapitre présente le paramétrage et les résultats des deux méthodes d'analyse de l'évolution du réseau cyclable d'OSM présentées dans le chapitre 8. La section 9.1 introduit le paramétrage des deux méthodes d'analyse d'évolution du réseau cyclable avec les snapshots utilisés, l'outil de traçage d'itinéraires et la définition de seuils essentiels au bon fonctionnement de ces méthodes. La section 9.2 présente les résultats pour les deux approches. Ce chapitre permet de répondre aux questions de recherche $\mathcal{Q}3.2$ et $\mathcal{Q}3.3$ respectivement sur les conflits d'usage et l'analyse thématique de la région Centre-Val de Loire.

## 9.1 Paramétrage

Cette section décrit comment sont déterminées les valeurs de plusieurs variables nécessaires au lancement de l'approche par itinéraires. Nous décrivons en premier les snapshots, que ce soit la période d'étude mais aussi le découpage spécifique de la zone d'étude en zones d'intérêts. Nous évoquons ensuite l'outil de traçage d'itinéraires utilisé avant de définir certains seuils pour obtenir des résultats représentatifs de l'usage du cyclisme avec des temps de calculs courts.

### 9.1.1 Snapshots

Les snapshots utilisés dans ce chapitre sont des exports complets d'OSM issus du site web Geofabrik. La zone d'étude choisie est la région Centre Val-de-Loire et tous les snapshots datés du $1^{er}$ janvier entre 2014 et 2022 inclus sont retenus soit 9 snapshots.

Les zones d'intérêts sont des rectangles incluant l'ensemble de chaque ville choisie (Tours, Orléans, Blois et Bourges) et une partie de son agglomération. Pour la Sologne et la Beauce, un rectangle incluant la plus grande surface possible sans zone de contact avec des zones urbaines importantes délimite ces deux zones. Les six zones d'intérêts sont présentées dans la figure 9.1.

Ces six zones représentent des espaces plus ou moins urbanisés. D'abord, Tours et Orléans sont les deux principales villes de la région. Elles disposent d'un environnement très spécifique par rapport au reste de la région. Ensuite, Blois et Bourges sont des villes moyennes de la région.

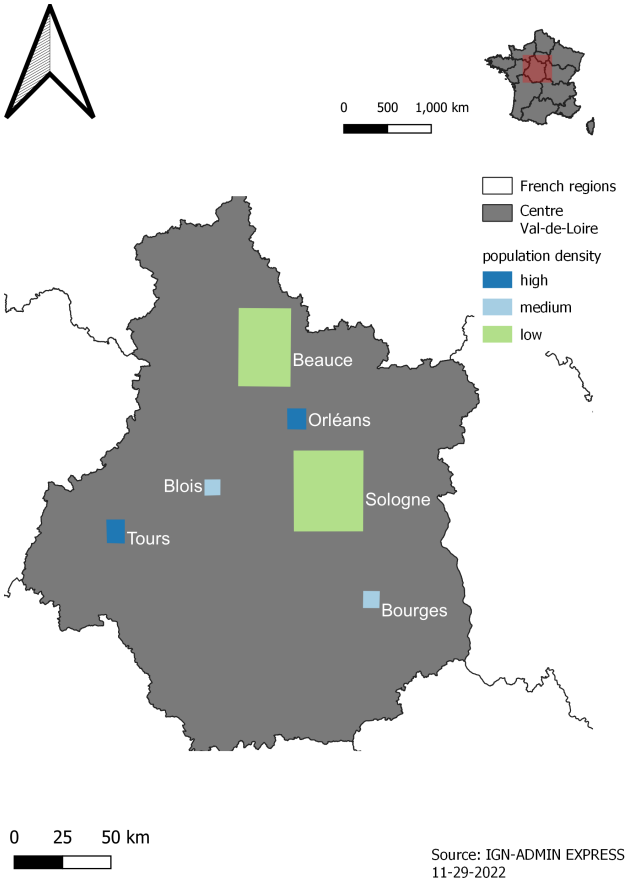



FIGURE 9.1 – Localisation des six zones d'intérêts issue de [Bres *et al.* 2023]

Pour finir, la Beauce et la Sologne sont des zones rurales comme la majorité de la région. Nous constatons que ces six zones représentent l'intégralité de la région.

Pour la Beauce, la zone a été limitée au Nord par l'agglomération de Chartres, ce qui aurait amené une zone urbaine dans une de nos deux zones rurales. Pour la Sologne, les villes de Contres à l'Ouest et Vierzon au Sud ont joué le même rôle. L'idée principale pour la Sologne était de retrouver les principaux sites touristiques de la zone que sont les châteaux de Chambord ou Cheverny par exemple.

### 9.1.2 Profil cycliste dans l'outil de traçage d'itinéraire

L'outil de traçage d'itinéraires retenu est OSRM ([Luxen & Vetter 2011]). Cet outil demande un jeu de données d'OSM et calcule un itinéraire en utilisant l'algorithme des plus courts chemins nommé *customize route planning*. En plus de cela, OSRM permet d'appliquer des poids sur chaque tronçon de route en fonction des tags décrivant ces tronçons. Cela amène à la construction d'un profil spécifique aux cyclistes pour cette expérience. Les développeurs d'OSRM proposent trois profils pour utiliser leur outil : un profil pour les voitures, un profil pour les piétons et un profil pour les cyclistes. Le profil retenu comporte six grandes catégories qui sont expliquées par la suite : les routes interdites, la manière de se déplacer à vélo, la présence de barrière à la circulation, les routes inaccessibles, la vitesse de déplacement en fonction du type de revêtement et le cas où plusieurs des cinq pénalités citées seraient appliquées en même temps. Il y a aussi la possibilité de créer son propre profil. Le profil cycliste a servi de base pour ces expériences en lui appliquant un

changement majeur : l'interdiction d'utiliser les tronçons ayant le tag suivant : *highway = trunk* ou *highway = trunk_link*. Ces deux tags font références aux voies à accès réglementé qui sont interdites aux cyclistes dans les zones d'intérêts. Le profil de cycliste d'OSRM prévoit que l'utilisateur puisse se déplacer sur son vélo ou en marchant à côté de son vélo. Le mode cycliste dispose d'une vitesse par défaut de 15km/h et le mode de marche à côté du vélo de 4km/h. Une pénalité importante est ajoutée au moment de changer de mode de transport. Si une barrière est présente sur la route alors cette route est laissée de côté. Certains tronçons à accès restreint sont aussi enlevés du réseau comme les pistes forestières ou agricoles. Les tronçons ayant le tag *access = use_sidepath* sont également évités car ce tag indique la présence d'une infrastructure cyclable obligatoire en parallèle de la voie disposant de ce tag. Ensuite, la vitesse est réduite dans les chemins en fonction de leur dangerosité. Les tronçons disposant du tag *highway = path* sont limités à 13km/h et les tronçons avec *highway = track* à 12km/h. Pour les escaliers, la vitesse descends à 2km/h. Toute utilisation d'un tronçon de rail est limité à 10km/h s'il est empruntable à vélo. Les parkings sont eux limités à 10km/h pour tout les usagers. Les ferries et ponts amovibles sont limités à 5km/h. Le revêtement a aussi un impact dans le calcul de la vitesse d'un tronçon. La vitesse maximale n'est conservée que pour les tags suivants *highway = {asphalt, chipseal, concrete, concrete_lanes}*. L'ensemble des autres surfaces ont une pénalité en fonction de la pénibilité de la surface. Dans le cas où plusieurs pénalités expliquées plus haut sont appliquées, la vitesse minimale est retenue.

### 9.1.3 Définition de seuils

Cette sous-section présente la manière dont certains seuils ont été définis pour les méthodes d'analyses de l'évolution du réseau cyclable.

**Distance maximale au réseau** La distance maximale au réseau représente l'écart entre le point de départ ou d'arrivée d'un itinéraire et le point le plus proche de ce dernier sur le réseau cyclable. Ce paramètre est important à prendre en compte pour deux raisons. D'abord, si ce seuil est faible, le générateur de points de départ et d'arrivée va avoir beaucoup plus de points dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales. De plus, l'algorithme de génération de points va être moins efficace dans les zones avec une faible densité de points. Cependant, si la distance est trop grande, alors un même point a de grandes chances de ne pas être raccordé au même endroit du réseau pour différents snapshots. Or, nous souhaitons que deux itinéraires partageant le même identifiant commencent et terminent au même point du réseau pour les comparer par la suite.

Afin de trouver la distance au réseau idéal, plusieurs valeurs sont testées sur une partie de la région Centre Val-de-Loire englobant Orléans, Blois et beaucoup de zones rurales dont une partie de la Sologne et de la Beauce. L'objectif est d'avoir une distribution des itinéraires très légèrement centrée sur les villes mais en restant assez uniforme. Nous avons testé les distances au réseau de 10m, 20m, 50m, 100m, 200m, 500m et 1km. La représentation spatiale des itinéraires obtenus pour ces différentes distances au réseau sont représentées dans la figure 9.2 pour la valeur retenue et dans l'annexe A.

La figure 9.2 et l'annexe A montrent que les zones rurales comme la Sologne (en bas à droite sur chaque image) ont très peu d'itinéraires, ce qui confirme notre hypothèse que le temps de calcul serait beaucoup plus long dans cette zone d'intérêt avec une distance au réseau faible. Cependant, pour éviter de réduire les performances, nous devons opter pour une valeur modérée. C'est pour cela que nous choisissons une distance de 100 mètres par rapport au réseau.

**Longueur des itinéraires** La longueur des itinéraires pour aller au travail à vélo est un facteur clé dans son utilisation. Comme le montre [Banerjee *et al.* 2022], la majorité des personnes venant au travail à vélo sont à moins de 4.5km de leur lieu de travail. Cependant, une petite part d'itinéraires atteint 16.9km ce qui nous laisse penser que les itinéraires doivent aussi représenter cet usage. Avec ces données en tête, nous avons défini que le point d'arrivée d'un itinéraire devait se situer entre 300m et 5km à vol d'oiseau du point de départ. La valeur minimale empêche le risque d'avoir des itinéraires ayant une distance quasiment nulle, tandis que la valeur maximale limite la longueur des itinéraires à une distance raisonnable pour la majorité de la population.

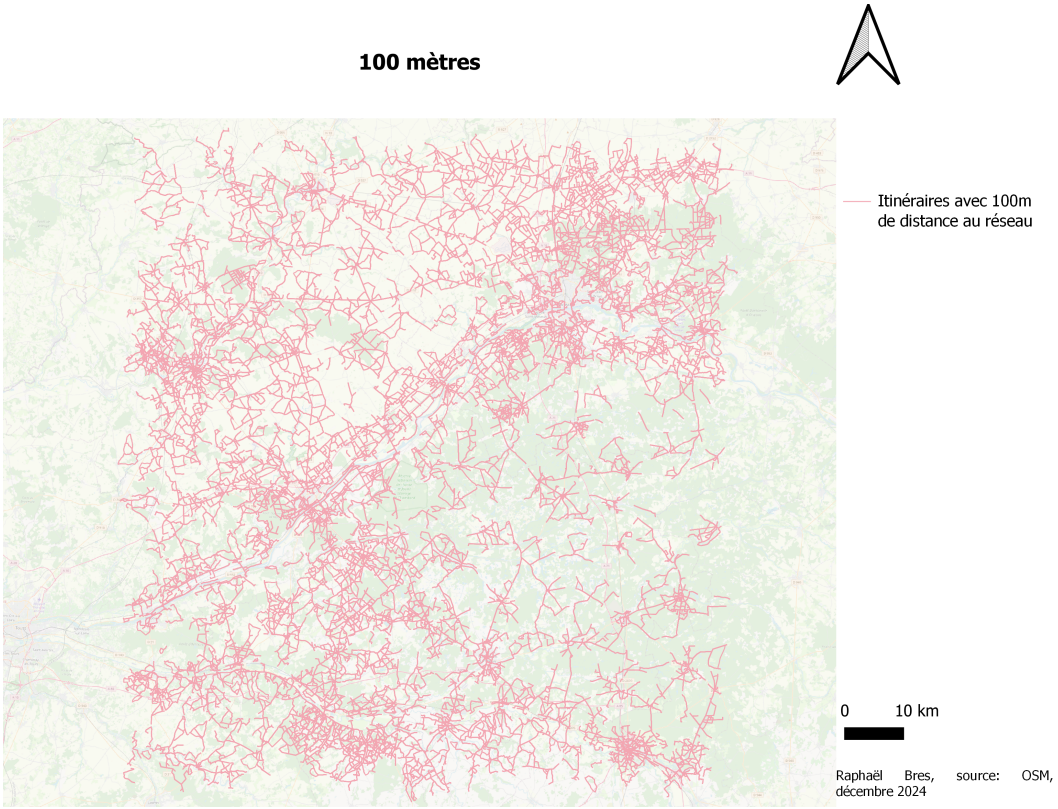



FIGURE 9.2 – Représentation spatiale des itinéraires avec une distance au réseau de 100 mètres. Test dans une partie de la région Centre Val-de-Loire

## 9.2 Résultats

Cette section regroupe l'ensemble des résultats liés aux approches par tronçons de route et par itinéraires. Nous apportons des premiers éléments de discussion autour de ces résultats. Nous souhaitons mettre en valeur l'évolution de l'usage cycliste ainsi que, si possible, les conflits d'usage avec les piétons ou les véhicules à moteurs.

### 9.2.1 Approche par tronçon de route

Cette sous section reprend la même structure que la sous-section du chapitre 8 expliquant les sorties de l'approche par tronçons de route.

**Évolution de la longueur par classe sémantique** Le tableau 9.1 présente l'évolution de la longueur totale des tronçons de route de chaque classe en utilisant les familles d'infrastructures. Cette approche a été privilégiée pour avoir un tableau lisible. Les valeurs en pourcentage représentent l'évolution entre le jeu de données au temps n+1 comparé à celui au temps n.

Le tableau 9.1 montre que, comme attendu, les infrastructures des véhicules à moteurs constituent la majorité du réseau routier. Ces infrastructures augmentent légèrement à travers le temps excepté entre 2014 et 2015, une année qui a connu une croissance importante pour tous les types d'infrastructures. La longueur des infrastructures cyclables a doublé durant la période d'étude avec deux moments de stagnation en 2018 et 2020. Les infrastructures piétonnes ont connu un saut important entre 2017 et 2018, probablement grâce à un grand nombre de contributions concernant les trottoirs d'une grande ville. L'augmentation de la longueur des infrastructures piétonnes est

| Année | Infrastructures cyclables | Infrastructures piétonnes | Infrastructures pour les véhicules à moteurs | Total |
|---|---|---|---|---|
| 2014 | 828.4 | 2602.2 | 92960.2 | 96390.8 |
| 2015 | 932.7 (+12.6%) | 3227.7 (+24%) | 109207.3 (+17.5%) | **113367.7 (+17.6%)** |
| 2016 | 1086.7 (+16.5%) | 3820.9 (+18.4%) | 114158.8 (+4.5%) | 119066.5 (+5%) |
| 2017 | 1204.5 (+10.8%) | 4228.7 (+10.7%) | 120545.6 (+5.6%) | 125978.7 (+5.8%) |
| 2018 | **1209.1 (+0.4%)** | **6331.0 (+49.7%)** | 129185.6 (+7.2%) | 136725.7 (+8.5%) |
| 2019 | 1373.6 (+13.6%) | 7092.8 (+12%) | 133515.9 (+3.4%) | 141983.4 (+3.8%) |
| 2020 | 1370.0 (-0.3%) | 7556.4 (+6.5%) | 138191.7 (+3.5%) | 147118.1 (+3.6%) |
| 2021 | 1526.2 (+11.4%) | 8047.2 (+6.5%) | 140364.0 (+1.6%) | 149937.4 (+1.9%) |
| 2022 | 1623.2 (+6.4%) | 8766.3 (+8.9%) | 143278.3 (+2.1%) | 153667.8 (+2.5%) |

TABLE 9.1 – Évolution de la longueur des tronçons de route (en km) pour chaque snapshot avec la classification en 3 classes

plus importante que celle des infrastructures cyclables. Nous n'avons pas forcément d'hypothèse claire sur les différentes périodes d'augmentation et de stagnation. Cependant, nous pensons que l'évolution des différents usages ne sont pas corrélés.

**Évolution des types d'éditions par année** Le tableau 9.2 présente la longueur des tronçons de route appartenant à chaque type d'édition entre deux snapshots au temps $n$ et $n+1$.

Le pourcentage indique le ratio de la longueur des tronçons pour chaque catégorie d'édition par rapport à la longueur totale des tronçons pour le jeu de données au temps $n$.

Le tableau 9.3 présente la longueur des tronçons mis à jour, distingués entre les mises à jour thématiques, sémantiques et géométriques. Les pourcentages sont liés à la longueur des tronçons de routes mis à jour pour le snapshots au temps $n$ montré dans le tableau 9.2.

Nous observons dans le tableau 9.3 que la longueur des tronçons ajoutés et supprimés diminue avec le temps, quand celle des tronçons mis à jour reste stable et diminue par rapport à la longueur totale du réseau cyclable. La longueur des tronçons qui restent identiques entre deux snapshots consécutifs augmente aussi bien en valeur absolue qu'en pourcentage.

Cela montre que les contributeurs d'OSM en Centre Val-de-Loire se rapprochent progressivement d'une stabilité dans cette zone avec une faible quantité de mises à niveau. Les quelques mises à jour restantes sont nécessaires pour tenir compte des changements du monde réel.

**Matrices de transition** Le tableau 9.4 présente l'évolution de la longueur des différentes classes sémantiques entre deux snapshots consécutifs (2018 et 2019).

Nous avons calculé une matrice de transition pour chaque paire de snapshots consécutifs. La diagonale principale représente la stabilité, c'est à dire la longueur de tronçons de route n'ayant

| Période | Ajouté | Supprimé | Identique | Mis à jour |
|---|---|---|---|---|
| 2014-2015 | 18405.4 (16.9%) | 1428.6 (1.3%) | 59035.0 (54.3%) | 29843.7 (27.5%) |
| 2015-2016 | 12550.2 (10.8%) | 700.6 (0.6%) | 76742.6 (66.1%) | 26085.2 (22.5%) |
| 2016-2017 | 11062.8 (8.9%) | 525.2 (0.4%) | 87909.2 (70.6%) | 25081.7 (20.1%) |
| 2017-2018 | 13100.6 (9.7%) | 497.6 (0.4%) | 87305 (64.8%) | 33928.3 (25.2%) |
| 2018-2019 | 8218.2 (5.8%) | 561.1 (0.4%) | 99916.9 (71.1%) | 31850.6 (22.7%) |
| 2019-2020 | 7685.2 (5.3%) | 514.7 (0.4%) | 105156.1 (71.8%) | 33005.8 (22.6%) |
| 2020-2021 | 4762.3 (3.2%) | 865.5 (0.6%) | 116247.0 (77.9%) | 27286.7 (18.3%) |
| 2021-2022 | 5650.8 (3.7%) | 474.8 (0.3%) | 120891.5 (78.9%) | 26201.0 (17.1%) |

TABLE 9.2 – Évolution de la longueur des tronçons de route (en km) par type de modification (ratio par rapport à la longueur totale en %)

| Période | Géométrique | Sémantique | Thématique |
|---|---|---|---|
| 2014-2015 | 26187.6 (87.7%) | 271.7 (0.9%) | 10782.9 (36.1%) |
| 2015-2016 | 23112.2 (88.6%) | 335.1 (1.3%) | 7249.8 (27.8%) |
| 2016-2017 | **22829.9 (91%)** | 385.1 (1.5%) | 5045.6 (20.1%) |
| 2017-2018 | 29104.6 (85.8%) | 229.1 (0.7%) | 10061.8 (29.7%) |
| 2018-2019 | 25246.0 (79.3%) | 527.3 (1.7%) | 12103.4 (38%) |
| 2019-2020 | **30696.7 (93%)** | 292.3 (0.9%) | 5511.0 (16.7%) |
| 2020-2021 | 24798.5 (90.9%) | 405.9 (1.5%) | 5353.1 (19.6%) |
| 2021-2022 | 22580.0 (86.2%) | 479.2 (1.8%) | 6677.2 (25.5%) |

TABLE 9.3 – Évolution de la longueur des tronçons de routes (en km) par leur type de mise à jour (pourcentage de la longueur par rapport à la longueur totale des objets mis à jour)

pas changé entre deux dates consécutives. Les éléments en dehors de la diagonale principale représentent, quant à eux, les longueurs des tronçons ayant connu une transition entre deux classes d'infrastructures cyclables données. A titre d'exemple, nous montrons dans le tableau 9.4, l'évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2018 et 2019. Les matrices d'évolution pour les autres dates à savoir sont présentées dans l'Annexe A.

Nous observons dans le tableau 9.4 que le réseau piéton fait l'objet de beaucoup plus de créations que les infrastructures cyclables (13.2% de la longueur des nouveaux tronçons créés entre 2018 et 2019 pour le réseau piéton contre 1.8% pour les infrastructures cyclables). Cependant, les infrastructures cyclables les plus crées dans OSM entre ces deux snapshots sont les pistes cyclables, qui sont les infrastructures les plus sécurisées. Des conflits d'usages sont observés ici entre les cyclistes et les piétons où 3% des pistes cyclables se sont transformées en un aménagement priorisant les piétons. Nous constatons aussi de nombreuses transformations depuis les bandes cyclables, les voies partagées et le réseau piéton vers les infrastructures des véhicules à moteurs. Nous n'avons aucune explication concernant cela. L'image 9.3 montre les catégories d'édition de chaque tronçon sur les périodes 2014-2015 et 2021-2022 dans trois zones avec des caractéristiques différentes : Tours qui est l'une des deux plus grandes villes de la région, Blois qui est une ville de taille moyenne à l'échelle de la région et la Sologne qui est une zone rurale principalement composée de forêts et d'étangs.

L'image 9.3 montre que la Sologne a un réseau beaucoup plus dense en 2022 avec une majorité de routes identiques entre 2021 et 2022. Pour Tours, beaucoup de tronçons sont mis à jour durant

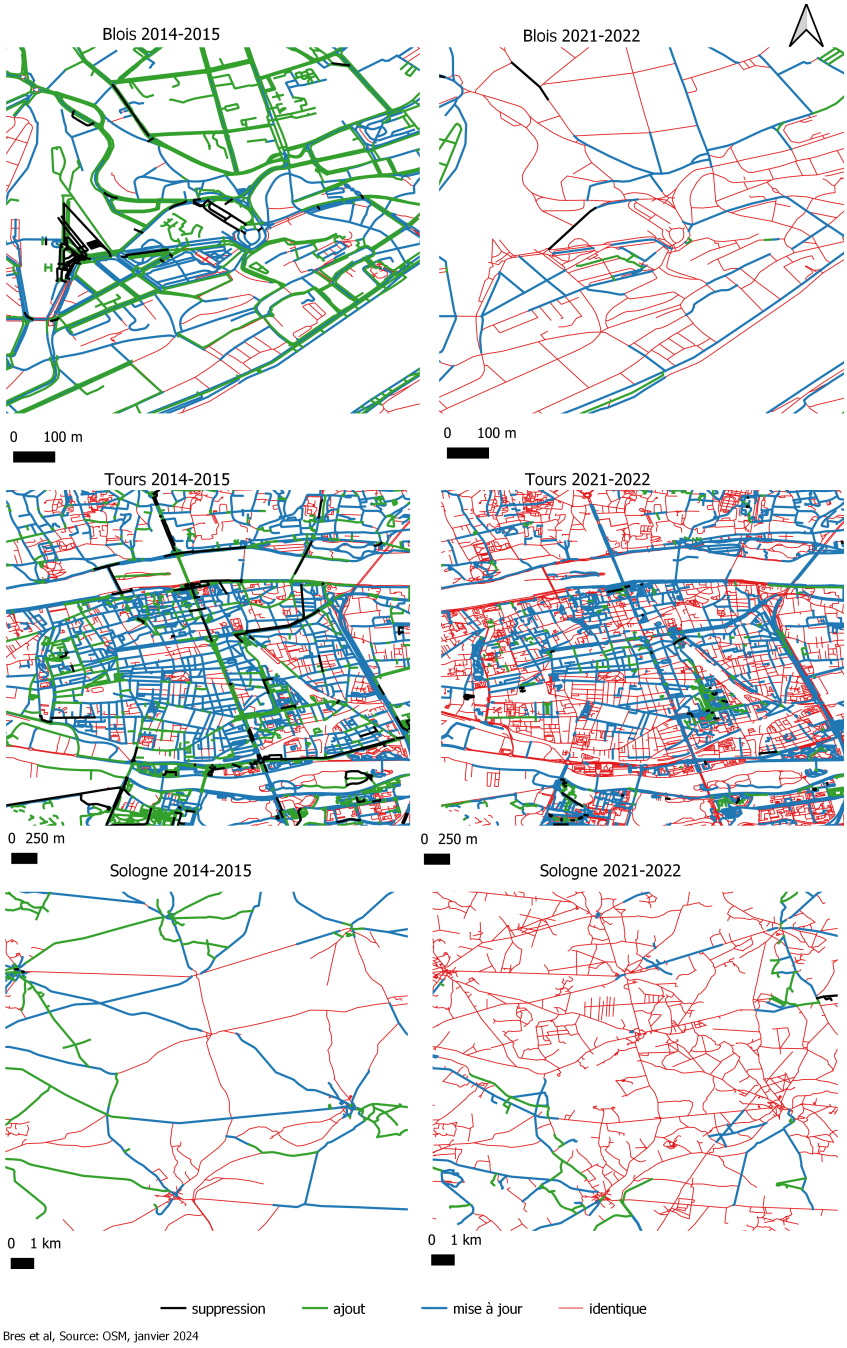



FIGURE 9.3 – Évolution des tronçons de route par type d'édition à Tours, Blois et en Sologne, issu de [Bres *et al.* 2024]

les deux périodes. Nous observons que certaines zones se distinguent comme le groupe de tronçons en vert au milieu de la carte de 2021-2022 ou des groupes rouges, par exemple, en bas à gauche de cette même carte. Ces groupes rouges peuvent être une indication que les activités des contributeurs sur la zone ont abouti à une forme de stabilité, où peu de mises à niveau sont nécessaires et où la plupart des éditions sont des mises à jour. Le réseau est aussi entre les deux périodes. Cela montre

| 2018 \ 2019 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 90.2% | 0.0% | 0.0% | **3.0%** | 0.8% | 0.0% | 6.0% | 100% |
| Bande cyclable | 0.0% | 97.6% | 0.6% | 0.0% | **1.6%** | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.2% | 96.5% | 0.1% | **3.0%** | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Réseau piéton | 0.2% | 0.0% | 0.0% | 93.4% | **4.9%** | 0.0% | 1.5% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 99.6% | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.3% | 98.1% | 1.7% | 100% |
| N'existe pas | **1.4%** | **0.3%** | **0.1%** | **13.2%** | 81.8% | 3.2% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.3% | 0.2% | 5.0% | 91.6% | 2.1% | 0.4% | 100% |

TABLE 9.4 – Évolution (en %) de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2018 et 2019

que les grandes villes étaient déjà bien représentées dans OSM au début de la période d'étude. Pour Blois, nous remarquons une majorité de routes en vert sur la carte de 2021-2022. Cela s'explique par une campagne d'ajout des trottoirs dans la ville qui amène de très nombreux ajouts de tronçons. Nous remarquons aussi un groupe noir sur la carte de 2021-2022 qui s'explique par d'importants travaux de réfection d'une place. Le réseau est aussi plus dense en 2021-2022 qu'en 2014-2015.

En général, ces résultats montrent que les grandes villes (Tours et Orléans), les villes moyennes (Blois, Bourges, Châteauroux, Chartres) et les zones rurales ont des caractéristiques différentes pour leur réseau cyclable. Cette conclusion va dans le sens des zones d'intérêts retenues pour l'approche par itinéraires, à savoir les villes de Tours, Orléans, Blois et Bourges ainsi qu'une vaste zone en Sologne et en Beauce.

L'approche par tronçons de route calcule des indicateurs sur les infrastructures routières avec le point de vue d'un cycliste, et leur évolution dans notre zone d'étude où chaque tronçon est traité de la même manière. Cependant, la perspective cycliste met en avant certains tronçons de route plus adaptés à ce moyen de mobilité. Dans ce sens, l'approche par itinéraires complète l'approche par tronçons de route en incluant uniquement les tronçons utilisés par les itinéraires cyclistes.

### 9.2.2 Approche par itinéraires

Cette sous section regroupe l'ensemble des résultats liés à l'approche par itinéraires.

**Évolution de la longueur des itinéraires** Nous commençons ici par présenter les graphiques d'évolution de la longueur des itinéraires. La figure 9.4 présente la variation de l'évolution de la longueur des itinéraires entre deux snapshots consécutifs pour les zones d'intérêts de Tours, Orléans, Blois et Bourges. Les résultats de la Sologne et de la Beauce n'ayant presque pas de variabilité dans la longueur des itinéraires, la représentation en boite à moustache est inadaptée pour ces deux zones et elles sont donc laissées de côté. Dans l'optique d'une meilleure visualisation des variations, les données extrêmes ont été laissées de côté. Cependant, elles étaient très nombreuses et nécessitent un traitement spécifique.

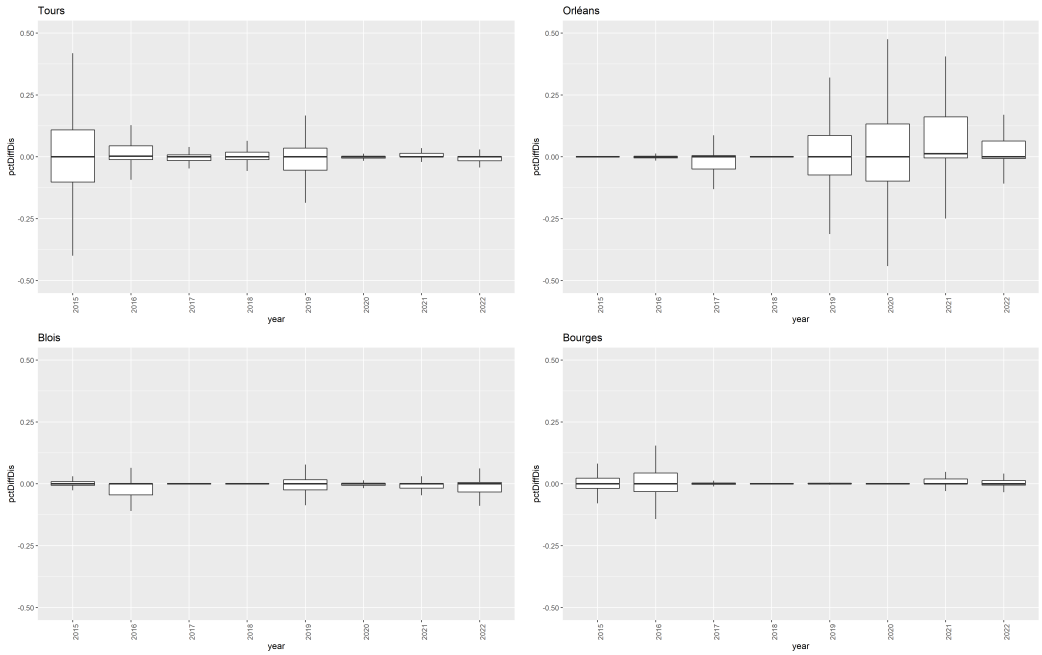



FIGURE 9.4 – Variation de l'évolution de la longueur des itinéraires entre deux snapshots consécutifs

Les itinéraires évoluent fortement à Tours entre 2014 et 2015 puis un peu moins fortement entre 2018 et 2019. Pour Orléans, les itinéraires évoluent très fortement à partir de 2019 avec les deux dernières années où la longueur des itinéraires a tendance à augmenter. Pour Blois, les évolutions sont en moyenne très faibles avec une diminution de la longueur des itinéraires entre 2015 et 2016, et entre 2021 et 2022. Pour Bourges, les itinéraires ont évolué en longueur entre 2015 et 2016 avec une légère tendance vers une augmentation de la longueur. Pour le reste de la période d'étude, la longueur est stable.

Ces graphiques ne présentent que la tendance globale des données et ne captent aucune information sur les changements de distance très importants. Afin de les identifier, la figure 9.5 présente l'évolution de la quantité d'itinéraires ayant évolué d'un moins 1%, 5%, 20% et 50% entre deux jeux de donnée consécutifs.

Les graphiques présentés en figure 9.5 montrent tous de très importants changements pour Blois entre 2020 et 2021. Cela s'explique par la correction d'une route empruntant l'un des trois ponts sur la Loire de la ville. Physiquement, ce pont est une voie à accès réglementé disposant d'une voie partagée entre cyclistes et piétons bidirectionnelle située sur le trottoir d'un côté de la route. Cependant, dans OSM, la route à deux chaussées pour les voitures était marquée en 2020 avec le tag *highway = primary*, ce qui permettait son utilisation par l'outil de traçage d'itinéraire. En conséquence, de nombreux itinéraires ont été modifié pour utiliser ce pont pour traverser la Loire, entraînant ainsi de nombreux changements de longueur des trajets en 2021. Ce changement est considéré comme une mise à niveau car la route a toujours été interdite aux cyclistes et ce problème existait de longue date. La figure 9.6 permet de visualiser ce pont dans son état actuel.

En plus des analyses d'évolutions illustrées par les figures 9.4 and 9.5, les tableaux 9.5 et 9.6 présentent l'évolution du nombre de tronçons effectivement utilisés dans l'approche par itinéraires pour chaque zone d'intérêt et le nombre total de tronçons présents dans chaque zone d'intérêt.

Dans les grandes villes, le nombre de tronçons est beaucoup plus grand, indiquant que dans ces villes, il y a beaucoup plus de tronçons et la longueur des tronçons est plus courte. Au contraire, les zones rurales ont beaucoup moins de tronçons effectivement utilisés, car les tronçons sont plus

TABLE 9.5 – Évolution du nombre de tronçons de route utilisé par au moins un itinéraire pour chaque zone d'intérêt

| Zone / Année | Tours | Orléans | Blois | Bourges | Sologne | Beauce |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2014 | 4058 | 2433 | 1467 | 1342 | 945 | 1087 |
| 2015 | 4788<br>18.0% | 2466<br>1.4% | 1603<br>9.3% | 1533<br>14.2% | 1032<br>9.2% | 1136<br>4.5% |
| 2016 | 4892<br>2.2% | 2588<br>4.9% | 1701<br>6.1% | 1718<br>12.1% | 1098<br>6.4% | 1231<br>8.4% |
| 2017 | 5004<br>2.3% | 2832<br>9.4% | 1720<br>1.1% | 1842<br>7.2% | 1122<br>2.2% | 1453<br>18.0% |
| 2018 | 5171<br>3.3% | 2857<br>0.9% | 1745<br>1.5% | 1894<br>2.8% | 1178<br>5.0% | 1588<br>9.3% |
| 2019 | 5339<br>3.2% | 3191<br>11.7% | 2049<br>17.4% | 1933<br>2.1% | 1310<br>11.2% | 1643<br>3.5% |
| 2020 | 5413<br>1.4% | 3646<br>14.3% | 2120<br>3.5% | 1995<br>3.2% | 1372<br>4.7% | 1681<br>2.3% |
| 2021 | 5525<br>2.1% | 3906<br>7.1% | 2099<br>-1.0% | 2081<br>4.3% | 1408<br>2.6% | 1690<br>0.5% |
| 2022 | 5679<br>2.8% | 4043<br>3.5% | 2408<br>14.7% | 2215<br>6.4% | 1457<br>3.5% | 1718<br>1.7% |

TABLE 9.6 – Évolution du nombre de tronçons de route présents dans chaque zone d'intérêt

| Zone / Année | Tours | Orléans | Blois | Bourges | Beauce | Sologne |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2014 | 11135 | 6272 | 2661 | 2650 | 2023 | 2244 |
| 2015 | 14977 | 6978 | 3406 | 3652 | 2539 | 2701 |
| 2016 | 16658 | 7868 | 3919 | 4428 | 2890 | 3327 |
| 2017 | 17874 | 8934 | 3978 | 4849 | 4052 | 3591 |
| 2018 | 19076 | 9317 | 4161 | 5059 | 4703 | 4244 |
| 2019 | 20917 | 14267 | 4849 | 5410 | 4969 | 4757 |
| 2020 | 21861 | 17738 | 5450 | 5798 | 5125 | 5288 |
| 2021 | 22899 | 20324 | 6497 | 6194 | 5243 | 5585 |
| 2022 | 24793 | 21689 | 8931 | 6973 | 5411 | 5776 |

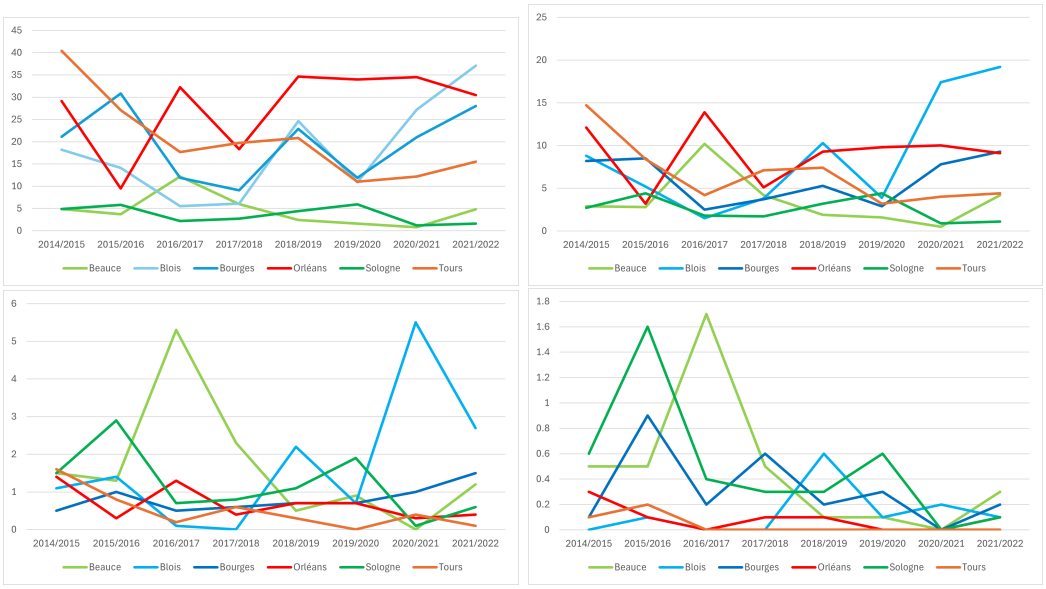



FIGURE 9.5 – Évolution de la quantité d'itinéraires évoluant d'au moins 1% (en haut à gauche), 5% en haut à droite), 20% (en bas à gauche) et 50% (en bas à droite) entre deux jeux de donnée consécutifs




FIGURE 9.6 – Le pont Charles de Gaulle de Blois qui amène de nombreux changements

longs et car il existe moins d' alternatives pour réaliser certains itinéraires. Concernant l'évolution, le nombre de tronçons pour la même zone d'intérêt augmente toujours entre deux snapshots consécutifs sauf pour Blois entre 2020 et 2021 (de 2120 tronçons à 2099). Cela s'explique par la mise à niveau du pont présenté en figure 9.6. Cette route, composée de nombreux petits tronçons, explique la diminution de cet indicateur. Notons que, l'ordre de grandeur de l'augmentation du nombre de tronçons dans l'approche par itinéraires est semblable entre les six zones d'intérêts.

**Centralité de la voie** Après avoir présenté l'évolution du nombre de tronçons dans chaque zone d'intérêts, nous présentons l'évolution de la moyenne de l'indicateur de centralité par tronçons dans la figure 9.7.

La tendance de la moyenne de l'indicateur de centralité du tronçon est une diminution très lente à travers le temps pour toutes les zones d'intérêts. Cependant, une augmentation entre deux snapshots consécutifs existe pour Blois entre 2020 et 2021. Cela s'explique par le même phénomène que celui expliqué dans le paragraphe sur l'évolution du nombre de tronçons (un pont marqué comme cyclable qui ne l'était pas). Afin de visualiser ce phénomène, les figures 9.8 et 9.9 représentent l'indicateur de centralité sur la zone de Blois respectivement en 2020 et 2021. Les cartes

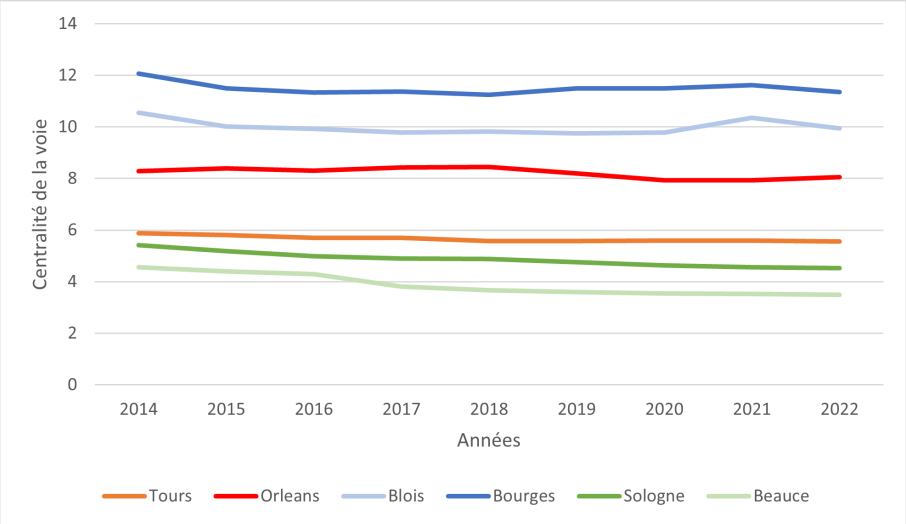



FIGURE 9.7 – Évolution de la moyenne de l'indicateur de centralité du tronçon de route

pour les cinq autres zones d'intérêts pour les mêmes années sont présentées en annexes A.

Les deux cartes de centralité mettent en avant la meilleure utilisation des infrastructures cyclables au niveau du pont ayant été corrigé entre 2020 et 2021 (figure 9.6). Sur la carte de 2020, la route interdite aux cyclistes est utilisée par une grande proportion d'itinéraires au détriment de la piste cyclable parallèle. Cependant, ce problème est bien corrigé en 2021 avec une utilisation plus forte de la piste cyclable et un rabattement vers d'autres ponts pour traverser la Loire.

Cependant, nous savons que cet indicateur contient beaucoup de données avec une valeur faible et peu de données avec des valeurs très fortes. Dans ce but, nous pensons trouver des évolutions plus marquées en nous rapprochant du maximum de l'indicateur de centralité. C'est pour cela que la figure 9.10 représente le $99^{eme}$ quantile de l'indicateur de centralité.

Nous constatons la même tendance décroissante mise à part pour Blois entre 2020 et 2022 et Tours entre 2018 et 2022. Les zones rurales disposent de valeurs extrêmes faibles pour cet indicateurs en comparaison avec les villes moyennes (20 contre 70). Cependant, les valeurs pour les grandes villes sont surprenantes car Tours a des valeurs proches des zones rurales quand Orléans se trouve très proche de Blois. Nous nous attendions à trouver trois groupes distincts sur ce graphique avec les grandes villes, les villes moyennes et les zones rurales. Or, Orléans se trouve dans le groupe des villes moyennes et Tours un peu au-dessus des zones rurales. Ces analyses diffèrent de celles pour la moyenne où les trois environnements différents (grandes villes, villes moyennes et zones rurales) étaient clairement séparées.

**Utilisation des infrastructures cyclables** Cette partie de l'approche par itinéraires est dédiée à l'analyse de la proportion des infrastructures cyclables dans les itinéraires générés au fil du temps. Premièrement, étant donné que la Beauce a pour chaque année 999 itinéraires sur 1000 ayant 100% d'utilisation du réseau des véhicules à moteurs, nous retirons cette zone des résultats de cette partie. La figure 9.11 présente le nombre d'itinéraires utilisant au moins une piste cyclable.

Concernant les figures 9.11, 9.12, 9.13 et 9.14, les données sont exprimées sur 5000 itinéraires possibles.

Les villes sont clairement mieux équipées en pistes cyclables comparées aux zones rurales où seulement 26 itinéraires sur 1000 en utilisent au moins une en 2022 en Sologne. Le nombre d'itinéraires empruntant au moins une piste cyclable augmente dans les cinq zones d'intérêts analysées (d'environ 250 à 400 à Blois, d'environ 250 à 750 à Orléans) sauf pour Tours où l'indicateur varie

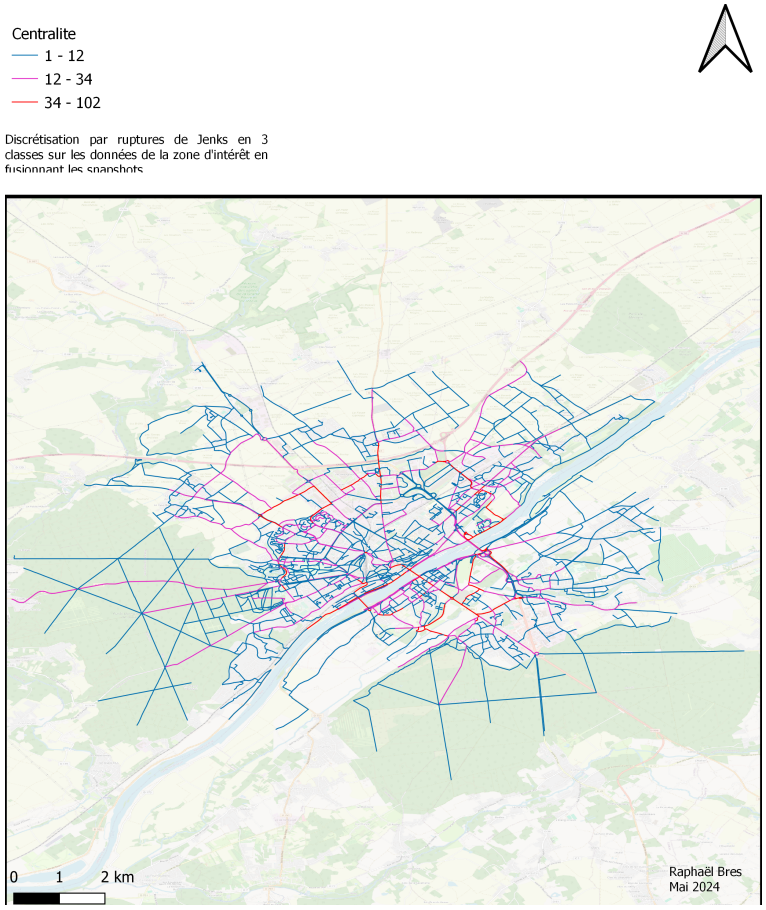



FIGURE 9.8 – Centralité du tronçon pour Blois en 2020

mais les valeurs sont proches entre le début et la fin de la période d'analyse (environ 400 itinéraires sur 1000). Notons que nous n'avons pas observé de différence entre les grandes villes et celles de taille moyenne au début de l'étude, en revanche, à la fin, les grandes villes ont significativement plus d'itinéraires empruntant au moins une piste cyclable. La forte augmentation d'itinéraires empruntant au moins une piste cyclable à Orléans est peut être le reflet d'une politique publique d'aménagement du territoire. L'augmentation est plus marquée entre 2016 et 2017 puis entre 2020 et 2021, soit le début de la crise de la COVID.

La figure 9.12 présente l'évolution du nombre d'itinéraires utilisant au moins une infrastructure cyclable. Les résultats sont comparables à la figure 9.11 car les tableaux sont réalisés sur les mêmes itinéraires et les mêmes zones d'intérêt. Seule la classe d'infrastructure cyclable est modifiée.

La différence entre les zones rurales et les villes s'accentue ici. Malgré une augmentation notable du nombre de pistes cyclables au fil du temps, les petites villes et les zones rurales ont tendance à avoir moins d'itinéraires empruntant des infrastructures cyclables à la fin de la période d'étude comparativement aux grandes villes (par exemple, une augmentation de 466 à 754 itinéraires pour Tours comparé à une augmentation de 2 à 32 pour la Sologne).

Des sauts majeurs sont observés sur la figure 9.12, comme entre 2018 et 2019 pour Blois et Bourges. Il n'est pas possible de conclure si ses sauts sont corrélés à une politique publique précise avec nos connaissances actuelles. Des investigations supplémentaires seraient nécessaires, par exemple, une analyse du comportement et de l'activité d'édition des contributeurs d'OSM à cette période pour voir si les mêmes contributeurs ont réalisé des contributions importantes dans

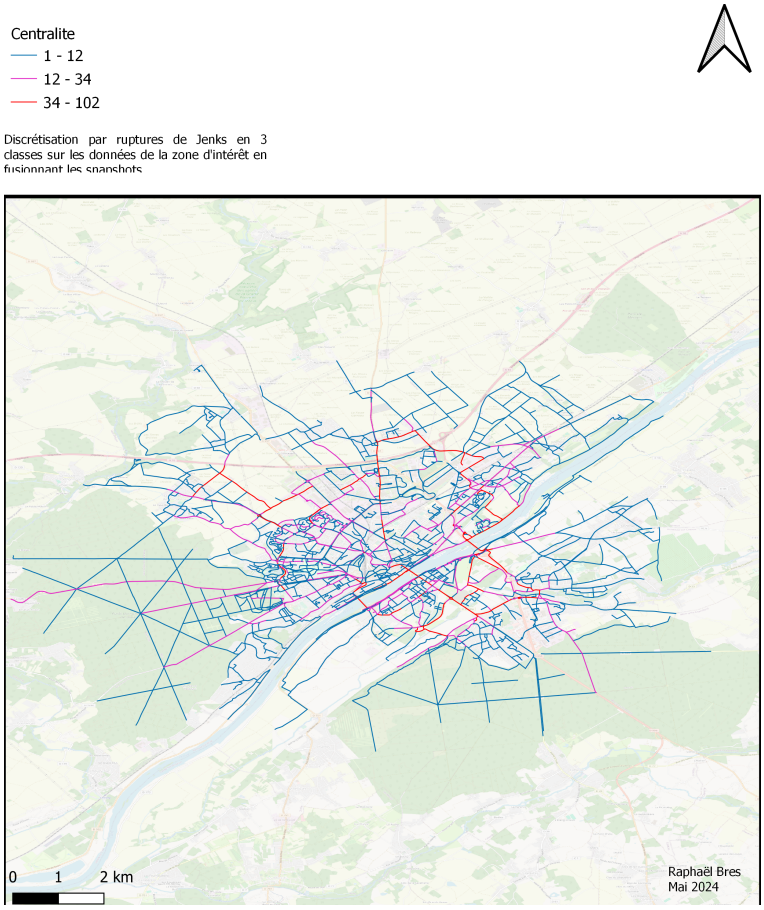



FIGURE 9.9 – Centralité du tronçon pour Blois en 2021

les deux zones d'intérêts ou si un import massif [Le Guilcher *et al.* 2022] a été fait dans cette zone.

Après avoir observé que beaucoup d'itinéraires utilisent peu d'infrastructures cyclables, la figure 9.13 présente l'évolution du nombre d'itinéraires utilisant au moins 30% de pistes cyclables.

Premièrement, nous observons que la Sologne n'a aucun itinéraire utilisant au moins 30% de pistes cyclables. L'évolution des quatre villes est différente avec Tours qui contient une diminution entre 2014 et 2016 et une faible augmentation après cela. Entre 2015 et 2016, la diminution peut s'expliquer par un changement sémantique sur une piste cyclable devenue un espace piéton. Cette route, découpée en plusieurs sections, a un score de centralité compris entre 40 et 50. Orléans a une forte augmentation du nombre d'itinéraire empruntant au moins 30% de pistes cyclables après la crise de la COVID. Les résultats à Bourges sont un peu plus faibles qu'à Orléans mais avec la même tendance jusqu'à la crise de la COVID où le nombre d'itinéraires empruntant au moins 30% de pistes cyclables diminue. La forte diminution est due à une piste cyclable de l'itinéraire cyclable *Coeur de France à Vélo* qui a été représentée dans OSM comme une voie piétonne sur la moitié de la zone d'intérêt. Nous trouvons pour la zone de Blois qu'un pont (le pont François Mitterrand) était mal référencé dans OSM jusqu'au jeu de données de 2016. Les ponts sont une zone de très forte influence sur l'ensemble des indicateurs car les passages pour traverser la Loire ne sont pas nombreux. Les trottoirs étaient référencés comme des pistes cyclables alors qu'en réalité l'infrastructure comprenait deux trottoirs, une route à quatre voies et deux bandes cyclables. Étant donné le nombre limité d'options pour traverser la Loire, ce pont faisait partie de nombreux itinéraires avant 2016, comptés comme empruntant des pistes cyclables et qui étaient impossibles

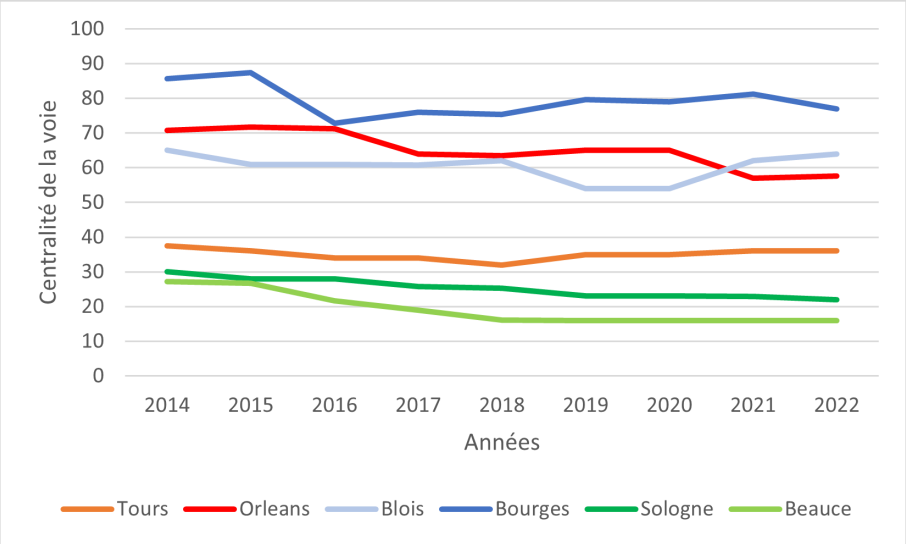



FIGURE 9.10 – Évolution du $99^{eme}$ quantile de l'indicateur de centralité du tronçon de route

dans la réalité.

La figure 9.14 montre que, à l'exception de la Sologne qui a le même comportement que précédemment, où chaque itinéraire a moins de 30% d'utilisation d'infrastructures cyclables, chaque ville compte de plus en plus d'itinéraires utilisant 30% d'infrastructures cyclables ou plus. Tours représente une écrasante majorité des itinéraires utilisant au moins 30% d'infrastructures cyclables au début de l'étude, ce qui suggère que Tours disposait déjà de bonnes pistes cyclables qui ont été complétées par des infrastructures partagées et des bandes cyclables pendant l'étude. Bourges a eu une forte augmentation entre 2018 et 2019 tandis que Blois a graduellement augmenté entre 2018 et 2021. De manière générale, le nombre d'itinéraires utilisant au moins 30% d'infrastructures cyclables a fortement augmenté à travers toutes les zones d'intérêts entre 2018 et 2019 puis entre 2020 et 2021. Le second saut est aussi visible dans le nombre d'itinéraires utilisant au moins 30% de pistes cyclables mais pas le premier saut. L'augmentation entre 2020 et 2021 a de très fortes chances d'être liée aux pistes cyclables temporaires crées pendant la crise de la COVID.

## 9.3 Conclusion

En résumé, dans ce chapitre, nous avons proposé et justifié le paramétrage des méthodes présentées dans le chapitre 8. Ce chapitre permet de finaliser la réponse à la question de recherche $\mathcal{Q}3.1$ sur la manière d'évaluer l'évolution du réseau cyclable et déjà approfondie dans le chapitre 8. Une attention particulière pourra être portée au générateur d'itinéraires afin qu'il incite plus fortement utilisation des infrastructures cyclables. De plus, un profil pour chaque usager présenté dans le chapitre 5 peut aussi être développé au lieu de ne conserver qu'un seul profil de cycliste qui est assez neutre en termes de poids mis sur certains critères.

Ce chapitre répond aussi à la question de recherche $\mathcal{Q}3.3$ portant sur l'analyse thématique du réseau cyclable de la région Centre-Val de Loire, en apportant de nombreux résultats sur l'évolution du réseau cyclable de la région Centre Val-de-Loire entre 2014 et 2022. Concernant les résultats de l'approche par tronçons de route, ils montrent d'abord que les infrastructures cyclables ont connu une forte augmentation entre 2014 et 2022 mais celle-ci reste bien inférieure à celle connue par les infrastructures piétonnes sur la même période. La quantité d'ajouts et de suppressions dans OSM se stabilise à la fin de l'étude pour signaler qu'une stabilité sur une partie non négligeable

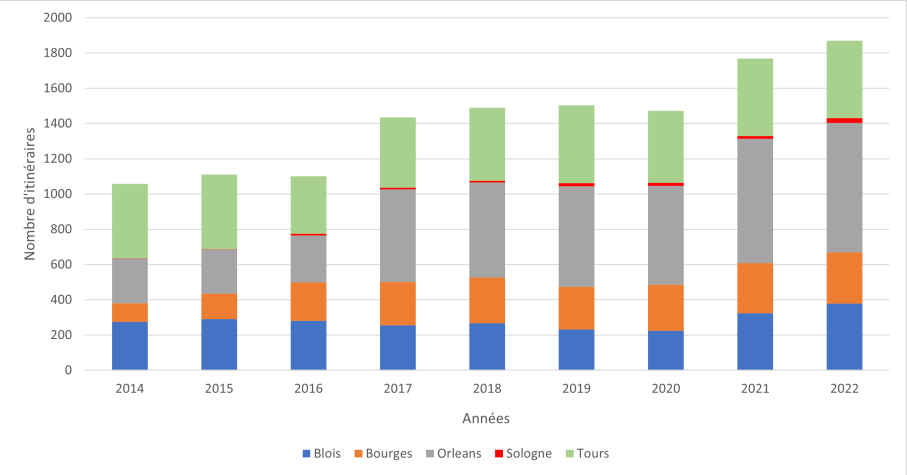



FIGURE 9.11 – Évolution du nombre d'itinéraires utilisant au moins une piste cyclable

de la région Centre Val-de-Loire est trouvée. Cependant, la part de mises à jour reste importante car le réseau routier évolue très vite. Nous retrouvons une majorité de mises à jour géométriques bien que les mises à jour thématiques restent aussi présentes en bonne quantité. Les mises à jour sémantiques sont minoritaires. La répartition spatiale de ces différents types d'édition est assez souvent centrée sur des zones précises pour l'ajout ou la suppression. Nous constatons aussi que les conflits d'usage se traduisent dans OSM par le retrait de certaines pistes cyclables qui sont transformées en infrastructures piétonnes. Ce point est un élément de réponse à la question $\mathcal{Q}3.2$ sur les conflits d'usage. Cependant, cette question mérite une plus grande attention avec l'application de l'analyse par itinéraires aux autres usages afin de comparer les scores de centralité des tronçons de route.

Concernant les résultats de l'approche par itinéraires, les variations de leur longueur diffèrent en fonction de la zone d'étude même si une différence claire se fait entre les zones rurales et les villes. Ces évolutions sont très nombreuses en ville mais peuvent être de très de faible ampleur car ces environnements offrent beaucoup d'alternatives au cyclistes contrairement aux zones rurales où les alternatives manquent. Dans ces zones rurales, les itinéraires subissent moins d'évolutions, mais celles-ci sont généralement de plus grande ampleur. Ce manque d'alternatives en zones rurales se traduit par le nombre de ways OSM impliquées dans l'analyse par itinéraires qui est inférieur à celui des villes alors que les zones rurales sont significativement plus grandes en terme de superficie. Les tronçons les plus empruntés sont généralement des tronçons importants des villes comme les ponts traversant un fleuve de ces grandes villes. Ce point nous confirme que l'outil de traçage d'itinéraires peut être grandement amélioré en privilégiant les grands axes cyclistes. Concernant l'utilisation des infrastructures cyclables dans ces itinéraires, la tendance est à l'augmentation marquée par des sauts importants entre 2018 et 2019 pour la création d'infrastructures cyclables et entre 2020 et 2021 (la crise de la COVID) pour la création de pistes cyclables.

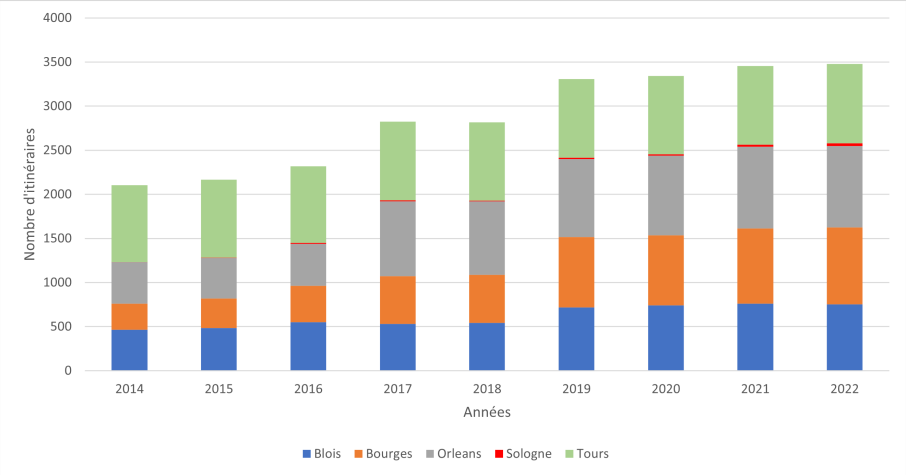



FIGURE 9.12 – Évolution du nombre d'itinéraires utilisant au moins une infrastructure cyclable

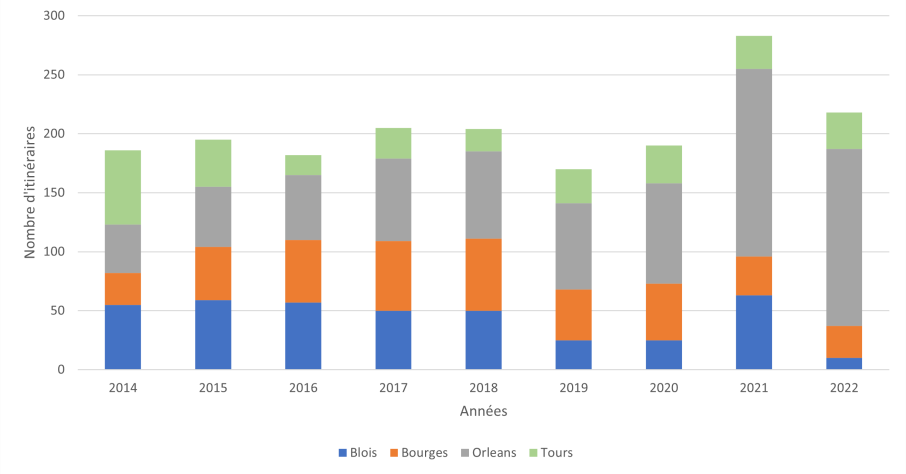



FIGURE 9.13 – Évolution du nombre d'itinéraire empruntant au moins 30% de pistes cyclables

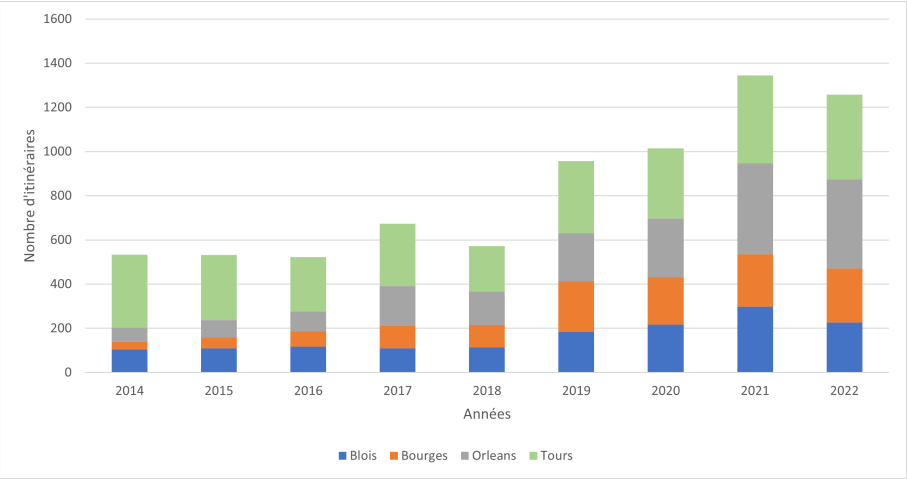



FIGURE 9.14 – Évolution du nombre d'itinéraires utilisant au moins 30% d'infrastructures cyclables

# Discussion

Dans cette partie, nous avons présenté deux approches complémentaires d'analyse de l'évolution du réseau cyclable. Une première approche dite par tronçons, analyse l'ensemble des tronçons de route de notre zone d'étude. Une seconde approche dite par itinéraire, inspirée des travaux de [Schmidl *et al.* 2021], consiste à simuler des itinéraires optimaux pour les cyclistes dans des zones d'intérêts qui sont des petites parties de notre zone d'étude mais qui sont représentatives de la diversité du paysage de cette zone. Cependant, notre approche a été adaptée à l'usage cycliste, qui est un usage prenant en compte beaucoup plus de critères que l'usage de la voiture. Ces méthodes répondent à la question $\mathcal{Q}3.1$ où nous recherchions une manière d'analyser le réseau cyclable. Ces deux méthodes sont basées sur le graphe multiplexe présenté dans le chapitre 8. Ce graphe présente l'avantage d'être plus facilement maniable que la BDRM adaptée aux cyclistes pour la partie de gestion de l'historique. Ce graphe comporte aussi moins d'attributs que la BDRM qui auraient été superflus dans l'analyse de l'évolution du réseau cyclable que nous avons proposée.

De plus, l'orientation vers l'usage est présente dans les deux méthodes avec la classe d'infrastructure cyclable issue du chapitre 5. attribuée à chaque tronçon qui représente sa vision par un cycliste. Cette orientation vers un usage spécifique est généralisable à tout usager de la route en créant pour chaque type d'usager sa propre structure de classes sémantiques fondée sur les tags d'OSM. Ce point permet de répondre à la problématique transverse P4 sur la généralisation de nos méthodes à d'autres usagers.

Ces deux méthodes permettent de réaliser un état des lieux du réseau cyclable dans la région Centre Val-de-Loire, ce qui répond à la question $\mathcal{Q}3.3$. Premièrement, l'approche par tronçons de route a montré que les infrastructures rurales sont principalement à destination des véhicules à moteur. Le réseau est aussi devenu plus dense à travers le temps grâce à une communauté OSM de plus en plus active. Cela est conforme à la dynamique identifiée dans la littérature d'après laquelle le nombre de tronçons a d'abord augmenté fortement avant de se stabiliser petit à petit. La crise de la COVID a permis la création de nombreuses pistes cyclables dans les villes. Les urbanistes ont pris conscience de la nécessité de créer des espaces sécurisés pour les cyclistes à travers cette crise. Le réseau des véhicules à moteurs reste le réseau dominant mais une partie de ce réseau est ré-allouée aux piétons et aux cyclistes. Il y a aussi une part non négligeable de routes réservées aux cyclistes qui deviennent piétonnes. Cela s'explique par des conflits d'usage issus de la forte augmentation du nombre de cyclistes. Tous ces changements vont dans une unique direction qui est l'apaisement des villes, où une autre mesure importante est la réduction de la vitesse maximale pour les voitures de 50km/h à 30km/h pour protéger les usagers vulnérables. L'exposition de ces conflits d'usage permet de répondre à la question $\mathcal{Q}3.2$. L'approche par tronçons de route met en valeur le fait que les contributeurs d'OSM ont trouvé un accord sur la représentation de la majorité du réseau routier d'OSM. La quantité de mises à jour dans le monde réel change en permanence et cela dépend des besoins d'OSM en mise à jour.

Deuxièmement, l'approche par itinéraires met en évidence la distinction entre les environnements ruraux et urbains. Les zones rurales n'ont pas beaucoup d'infrastructures cyclables, et quand elles existent, elles ont une orientation vers le tourisme qui se traduit par des itinéraires qui sont loin d'être optimaux et centrés autour des principaux monuments de la région. Des différences sont observées entre les villes mais il est difficile de conclure de manière générale que les villes moyennes et les grandes villes de la région ont de réelles différences. Les différences les plus marquantes sont aussi celles entre Tours et Orléans (les deux grandes villes) qui ont des comportements très différents comme dans l'évolution de l'indicateur de centralité. En effet, les résultats de cet indicateur montrent une proximité d'Orléans avec les villes moyennes quand Tours est très proche des zones rurales. Une variable manquante dans l'analyse de ces résultats est l'évolution des étiquettes politiques des dirigeants de ces villes/métropoles. Par exemple, des décisions d'élus soucieux d'écologie pourraient amener à de nombreux changements en faveur du cyclisme et de la marche un certain temps après leur élection. Un autre point important et déjà évoqué pour l'analyse des résultats de l'approche par tronçons est le partage entre les piétons et les cyclistes qui impacte les trajets

optimaux à vélo. En effet, la sécurité des piétons et des cyclistes implique de séparer les flux et les cyclistes doivent composer avec des itinéraires plus longs ou sur une route partagée avec les véhicules à moteurs. Le générateur d'itinéraires peut aussi être amélioré en accordant plus d'importance aux infrastructures cyclables et en évitant les axes routiers majeurs. De plus, la création de plusieurs profils de cyclistes en se basant sur le chapitre 5 est aussi une possibilité car un touriste va vouloir profiter d'un maximum de monuments et de sécurité au détriment de l'efficacité, à l'inverse d'un usager effectuant un trajet domicile travail où l'efficacité primera sur le reste. Ces différents profils d'itinéraires existent partiellement dans le générateur d'itinéraires de Géovélo [1]. L'augmentation du nombre d'itinéraires utilisant au moins 30% d'infrastructures cyclables montre que de plus en plus de routes peuvent accueillir les vélos dans de bonnes conditions. Pour confirmer ces propos, un indicateur avec un pourcentage plus élevé pourrait être calculé (au moins 50%).

Les deux analyses réalisées dans cette partie sont complétées par des explications fines sur certaines routes dans OSM amenant à des changements dans les résultats. Ces changements sont catégorisés soit en mise à jour soit en mise à niveau selon [Bres *et al.* 2022]. Nous constatons que de nombreux changements (par exemple celui du Pont Charles de Gaulle à Blois) sont des mises à niveau. Cela signifie qu'un problème de qualité a été rectifié. Nous n'avons pas détecté beaucoup de changements liés à l'évolution du réseau routier dans le monde réel (des mises à jour). La classification automatique des changements dans OSM en mise à jour ou mise à niveau est une perspective majeure dans l'analyse de qualité de VGI.

1. https://geovelo.app/fr/route/

# Conclusion

Chapitre 10

# Conclusion

## Sommaire

10.1 Conclusion générale . . . . . 179
10.2 Perspectives . . . . . 182

## 10.1 Conclusion générale

Nos travaux de recherche prennent pour cadre l'essor du cyclisme comme moyen de mobilité. À ce regard, nous avons étudié les définitions du réseau cyclable au regard de l'usage cycliste. Dans le chapitre 2, nous avons montré que la définition proposée par des urbanistes n'est pas totalement applicable à l'usage du cyclisme. Aussi, pour répondre à ce manque, nous avons proposé une définition du réseau cyclable centrée sur l'usage dans le chapitre 5. Cela signifie que l'ensemble des infrastructures où un cycliste est toléré sont prises en compte.

Dans la suite de notre raisonnement, nous nous sommes questionnés sur la représentation de ce réseau cyclable dans les BDRM existantes. Le chapitre 2 met en valeur le fait que l'usage principal des routes est bien renseigné mais les usages secondaires ne le sont pas. Or, le réseau cyclable utilise beaucoup d'infrastructures où un autre usager est prioritaire. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé une nouvelle BDRM adaptée à l'usage cycliste. Pour ce faire et avant de la modéliser, nous avons considéré deux points importants : la granularité du tronçon de route est-elle adaptée et quelles données extérieures aux routes devons nous implémenter ? Notre recherche nous a amené à conclure qu'il faut privilégier l'échelle de la voie de circulation. Cette dernière permet d'avoir une plus grande précision dans l'affectation d'un usage à une partie d'une route. En effet, lorsqu'une route dispose de deux voies pour les voitures et une bande cyclable de chaque côté, il est beaucoup plus facile d'affecter les bandes cyclables aux cyclistes et les deux voies centrales aux voitures au lieu d'affecter un seul usage pour l'ensemble du tronçon. Dans le même temps, nous avons recherché les potentielles sources de données extérieures aux routes dont les cyclistes ont besoin. Pour cela, nous avons constaté que le vent et le trafic routier sont deux éléments importants. De plus, la présence d'infrastructures cyclables est aussi un point crucial pour décider certains usagers potentiels à utiliser le vélo pour se déplacer. En combinant les deux points précédents, nous avons proposé dans le chapitre 6 une BDRM adaptée à l'usage cycliste et adaptable à tout usager de la route. La géométrie des routes est stockée à l'échelle de la voie de circulation, permettant de contenir plus d'informations sur chaque voie individuellement. Notre BDRM repose sur l'association *Utilise* qui affecte une priorité (adapté, toléré, interdit, impossible) à chaque triplet usager, voie, sens de circulation.

Une fois notre BDRM modélisée, nous nous sommes questionnés sur la capacité à instancier un tel modèle avec les données existantes à l'échelle du tronçon de route. Pour réaliser cela, nous avons défini un ensemble de règles (chapitre 7) pour retrouver l'ensemble des tronçons d'une base de données, affecter un nombre de voies à chaque tronçon puis donner les bonnes valeurs d'attributs à chaque voie. Certaines valeurs d'attributs sont issues de bases de données existantes, d'autres sont calculées ou déduites à partir des bases de données existantes et d'autres reposent sur des hypothèses. Ces différents moyens de complétion sont introduits afin de palier la mauvaise qualité des données dans les bases de données existantes pour les usages secondaires de chaque tronçon.

Cependant, nos expérimentations, présentées dans le chapitre 7, ont mis en évidence des problèmes principalement de complétude attributaire de la BDTOPO® et d'OSM pour instancier une BDRM à l'échelle de la voie de circulation. En effet, le nombre de voies que nous avons calculé à partir des tronçons de la BDTOPO® puis d'OSM à travers l'ensemble de notre zone d'étude est trop faible par rapport à nos estimations du monde réel. De plus, de nombreuses valeurs d'attributs importants pour le fonctionnement de cette BDRM sont, le plus souvent, manquantes comme la largeur des voies, indispensable si l'on souhaite différencier la géométrie de ces-dernières. Étant donné que la BDTOPO® dispose d'une bonne qualité dans son usage principal, nous nous concentrons sur OSM dont la qualité des données est plus variable.

Parmi les dimensions de la qualité (chapitre 3), nous nous sommes focalisés sur la fraîcheur. Dans ce chapitre, nous avons constaté que la fraîcheur dans une BDRM mise à jour en continu ne peut pas être évaluée de la même manière qu'une base de données classique. Nous avons évalué la fraîcheur par le prisme de l'évolution du réseau cyclable au regard des notions de mise à jour et de mise à niveau [Bres *et al.* 2022]. Pour évaluer l'évolution du réseau cyclable dans la perspective de l'usage, nous avons étendu les travaux de [Schmidl *et al.* 2021] présentant une approche basée sur la génération d'itinéraires optimaux pour les voitures.

Nous avons donc poursuivi ces travaux de recherche vers la proposition de deux méthodes d'analyse du réseau cyclable d'OSM présentées dans le chapitre 8. Ces deux méthodes reposent sur la représentation par un graphe multiplexe du réseau cyclable et de son évolution, où chaque couche représente un snapshot. La première est exhaustive et réalisée sur chaque tronçon de route d'une grande zone d'étude (la région Centre Val-de-Loire). La seconde concerne uniquement les tronçons qui sont théoriquement utilisés par les cyclistes dans de petites zones d'intérêt représentatives de notre zone d'étude. Cette seconde méthode repose sur la génération d'itinéraires optimaux pour le cyclisme entre des points de départ et d'arrivée. Ces points sont définis par un échantillonnage suivant une simulation de Monte Carlo et sont identiques d'un snapshot à un autre. Ces choix de méthode d'échantillonnage, de générations d'itinéraires optimaux et de modélisation en graphe sont motivés dans le chapitre 4.

Nous avons appliqué, dans le chapitre 9, ces deux méthodes sur la région Centre-Val de Loire où nous avons constaté une croissance du réseau cyclable dans les villes importantes de cette zone. Nous retrouvons encore des problèmes majeurs pour la circulation des cyclistes. Cependant, les zones rurales souffrent encore d'un manque important d'infrastructures cyclables non-touristiques. Ce manque dirige l'attention vers la création d'infrastructures cyclables dans ces zones au lieu de les représenter dans des bases de données.

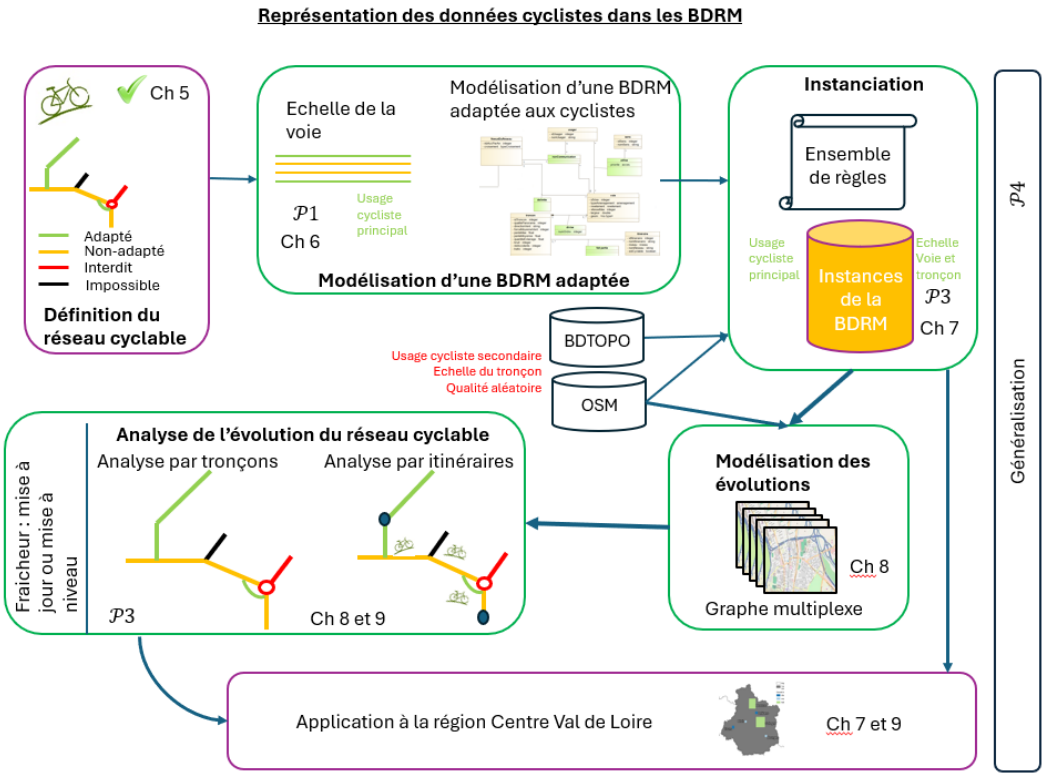
**Contributions** Pour résumer, les contributions de ce manuscrit sont les suivantes :

- Une définition du réseau cyclable. Nous définissons le réseau cyclable dans le chapitre 5 accompagné de ses multiples usages. Ces usages incluent les trajets vers le travail ou l'école, pour un déplacement lié à une activité utile, pour le loisir ou le tourisme, pour une livraison et pour un entraînement dans l'optique d'une compétition.
- Une modélisation de ce réseau cyclable. Nous présentons un modèle conceptuel d'une BDRM adaptée à l'usage du cyclisme dans le chapitre 6. Cette BDRM présente la singularité d'être à l'échelle de la voie de circulation contrairement à la majorité des autres bases de données qui s'appuient sur les tronçons de route.
- Deux instanciations de notre BDRM, et les règles associées, à l'aide de la BDTOPO® et d'OSM. Dans le chapitre 7, nous transformons les données de ces deux bases de données afin de créer deux instances de notre BDRM. Pour cela nous avons introduit un ensemble de règles selon les sources de données permettant une complétion à minima.
- Un graphe multiplexe dans le chapitre 8 est proposé. Il représente de manière simple les évolutions entre plusieurs snapshots consécutifs d'OSM [Bres *et al.* 2024].
- Deux méthodes d'analyse de l'évolution du réseau cyclable dans OSM [Bres *et al.* 2023, Bres *et al.* 2024] reposant sur le précédent graphe multiplexe. Nous proposons une méthode d'analyse par tronçons de route et une méthode par itinéraires. La première est une analyse exhaustive de l'ensemble des objets d'une grande zone d'étude. La seconde se concentre sur des zones spécifiques afin de les comparer et, à l'intérieur de ces zones, d'identifier et

analyser les tronçons de route étant théoriquement utilisés par les cyclistes. Elle réalise cela en générant des itinéraires optimaux pour le cyclisme.

— Une analyse thématique en appliquant les deux instanciations de notre BDRM ainsi que les deux méthodes d'analyse de l'évolution du réseau cyclable [Bres *et al.* 2024]. Nous avons constaté une amélioration des données relatives à l'usage cycliste mais cela reste insuffisant pour instancier un modèle aussi ambitieux comme notre BDRM. L'application de nos deux méthodes complémentaires d'analyse donne un éclairage sur l'évolution des infrastructures cyclables et confirme les dynamismes plus importants de leurs développement en zone urbaine que rurale. De même, la fraîcheur des données dans les zones urbaines est un élément clé afin de potentiellement mieux appréhender le développement des mobilités douces.

Afin d'illustrer les contributions et les questions de recherche, nous proposons sur la figure 10.1 un schéma récapitulatif de nos contributions. Dans ce schéma, les boites avec des contours arrondis représentent les contributions. Parmi ces boites, celles avec un contour vert représentent les contributions méthodologiques, celles en violet les contributions thématiques et celle en noir la généralisation de nos travaux.




Les encadrés représentent nos contributions. Les chapitres et les problématiques de recherche sont indiqués.

FIGURE 10.1 – Résumé des contributions de cette thèse.

Nos travaux et résultats nous amènent à formuler plusieurs nouvelles perspectives.

## 10.2 Perspectives

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont ouvert de nombreuses perspectives que nous présentons dans cette section. Nous pouvons identifier trois grandes catégories de perspectives : celles liées à l'enrichissement de notre BDRM, aux applications possibles de notre BDRM une fois ses données d'assez bonne qualité et l'amélioration des analyses de l'évolution du réseau cyclable.

Les premières perspectives évoquées sont centrées sur les améliorations de notre BDRM adaptée au cyclisme.

**Améliorations du modèle conceptuel de la BDRM** La première perspective concerne quelques améliorations à apporter à notre BDRM adaptée aux cyclistes. D'abord, nous avons utilisé plusieurs moyens pour instancier notre BDRM adaptée au cyclisme et cela impliquait de remplir certains attributs de différentes manières (issus directement d'une base de données source, calculés ou créés à partir d'une hypothèse). Nous souhaitons ajouter un attribut indiquant la manière dont un objet ou un attribut d'un objet de notre BDRM a été obtenu pour mieux référencer ce problème. Cela permet de réaliser une distinction rapide entre des objets de la BDRM avec une confiance élevée dans la qualité et les objets avec une confiance moins forte. Nous avons remarqué que certains attributs utilisés dans notre BDRM auraient un meilleur apport pour les usagers avec des valeurs renseignées en continu (e.g. météo, trafic). Un travail sur l'intégration de ces flux et les choix des informations à conserver reste donc à faire.

**Amélioration de l'instanciation de notre BDRM** La deuxième perspective consiste à améliorer le peuplement de la BDRM adaptée en combinant plusieurs sources de données (BDTOPO®, OSM, données climatiques). Nous avons vu de nombreux problèmes de qualité dans les sources de données utilisées pour instancier notre BDRM dans le chapitre 7. Cela passe d'abord par l'appariement de la BDTOPO® avec OSM. Ensuite, nous mettons en avant l'utilisation de données extérieures au réseau routier (données climatiques) qui apportent une information importante pour la sécurité et le confort des cyclistes. Le peuplement réalisé dans le cadre de ce manuscrit ne concernait que l'usage cycliste mais un peuplement de l'ensemble des usages de la route permettra la réalisation de nombreuses analyses avancées sur la mobilité. Afin d'avoir une version utilisable de notre BDRM dans le cadre d'analyses de mobilité ou d'évolution du réseau cyclable, nous devons principalement améliorer la détection du nombre de voies, leur usage et leur largeur. Pour réaliser cela, des algorithmes de détection de voies existent, principalement dans le domaine des voitures autonomes [Zakaria *et al.* 2023]. L'appariement des différentes sources de données avec les données potentiellement instanciées dans notre modèle à partir de la BDTOPO® est un travail que nous souhaiterions mener.

Les perspectives évoquées précédemment sont nécessaires avant d'appliquer notre BDRM aux thématiques que nous présentons dans les paragraphes suivants.

**Cyclabilité** Notre BDRM adaptée contient beaucoup d'attributs permettant de calculer un indicateur de cyclabilité pour une voie, un tronçon ou un itinéraire comme illustré dans le tableau 6.2. Nous pensons donc à calculer un nouvel indicateur de cyclabilité qui pourrait prendre plusieurs formes (score pour un itinéraire, un tronçon, une voie). La méthode de calcul de la cyclabilité en fonction des caractéristiques individuelles des tronçons est aussi au coeur de cette perspective. En effet, nous pensons qu'une agrégation vers des valeurs de cyclabilité faibles lorsqu'au moins un critère n'est pas bon est une stratégie correspondant au comportement de nombreux potentiels nouveaux cyclistes. Cela nous fait penser à l'agrégation MICA [Yager 1994]. De plus, la question posée lors de la première perspective concernant l'ajout d'attributs évoluant en continu est là aussi important. En effet, le trafic routier et le vent sont deux exemples de contraintes que l'on souhaite intégrer dans le cadre d'un itinéraire sécurisé et confortable. Hors, ces valeurs évoluent rapidement, ce qui rend l'utilisation de données en continu pertinent dans ce cas.

**Identification des conflits d'usage** Dans les chapitres 7 et 9, nous avons observé des conflits entre les différents usagers du réseau routier. Nous pensons que nous pourrons facilement les détecter une fois notre BDRM complètement instanciée. Ces conflits d'usages ont été mis en valeur dans OSM avec l'analyse de l'évolution du réseau cyclable. En effet, dans le monde réel il y a entre 10 et 15 ans, certains tronçons étaient créés avec le but d'accueillir des piétons et des cyclistes. Cependant, la forte augmentation de l'usage du vélo et la cyclabilité élevée de ces infrastructures amènent une quantité de cyclistes trop importante pour que les piétons s'estiment en sécurité. Cette sensation d'insécurité a conduit les autorités à transformer cet aménagement en une infrastructure dédiée aux piétons. Afin de confirmer cette hypothèse, nous pouvons mener l'analyse par itinéraires sur plusieurs modes de transport dans les mêmes zones d'intérêt et comparer les scores de centralité obtenus pour chaque usage. Cependant, les usages de la route ne sont pas tous facilement implémentables dans une base de données comme OSM ou notre BDRM adaptée. Autant, il peut être facile de réaliser une analyse sur l'usage de la voiture ou du piéton, autant cela peut être beaucoup plus compliqué pour les personnes à mobilité réduite car les informations sur les trottoirs sont très limitées. L'adaptation de nos travaux de recherche à cet usage demande une adaptation du profil de l'usager utilisé pour simuler les itinéraires. De plus, les informations attributaires nécessaires à cet usage (hauteur des trottoirs, absence d'obstacles pour un fauteuil roulant) ne sont pas présentes dans les BDRM existantes. Cela peut aussi être plus compliqué de réaliser un itinéraire pour des camions imposants, allant jusqu'aux convois exceptionnels qui ont des largeurs, hauteurs et poids très importants. Là aussi, la réalisation d'un profil adapté à cet usager est nécessaire pour adapter l'analyse par itinéraires.

**Application des analyses de l'évolution du réseau cyclable à notre BDRM** Ensuite, nous pensons pouvoir appliquer les analyses de l'évolution du réseau cyclable à notre BDRM. Cette analyse serait menée à l'échelle des voies de circulation. En effet, les résultats concernant le nombre de voies dans les instances de notre BDRM adaptée nous ont conduit à utiliser une autre structure à l'échelle du tronçon de route. Nous pensons que l'analyse par voie est plus fine et permet une meilleure séparation des usages qu'une analyse par tronçons de route où nous avons étiqueté chaque tronçon en fonction de l'ensemble des voies identifiées sur celui-ci. De plus, une analyse par itinéraire en calculant l'indicateur de centralité sur chaque voie de circulation pourrait permettre de séparer les deux sens de circulation dont la majorité des tronçons disposent. Cependant, la réalisation de l'analyse par itinéraire ne sera possible que lorsque notre BDRM pourra supporter un calcul d'itinéraires optimaux, ce qui n'est pas encore le cas et représente un travail de recherche important.

La suite des perspectives que nous proposons sont issues de l'analyse de l'évolution du réseau cyclable d'OSM.

**Échantillonnage stratifié pour les points de départ et d'arrivée de l'analyse par itinéraires** Cette première perspective à court terme concerne l'amélioration de l'approche par itinéraires et, plus spécifiquement, la génération des points de départ et d'arrivée de ceux-ci. Dans le chapitre 4, nous avons décrit plusieurs méthodes d'échantillonnage, et nous avons opté, dans le chapitre 8, pour la simulation de Monte Carlo. En effet, elle est très flexible et peut être mise en place simplement. Cependant, les points de départ et d'arrivée sélectionnés aléatoirement ne sont pas spécifiquement pertinents pour les cyclistes. Elle est aussi la moins proche des points de départ et de destination réels des cyclistes. Afin de se rapprocher de ce comportement, nous proposons d'utiliser des points d'intérêts et des zones définies comme susceptibles d'être visées par des itinéraires cyclables. Cela inclut des zones résidentielles, des gares, des zones avec beaucoup d'entreprises ou d'écoles par exemple. Il sera possible d'échantillonner de manière plus pertinente les points de départ et d'arrivée dans l'analyse par itinéraire, en s'appuyant sur la localisation de ces points d'intérêt et une estimation de la proportion de chaque usage du cyclisme décrit dans le chapitre 5. Pour estimer ces proportions, un jeu de données de mobilités à vélo, potentiellement sur le modèle d'une enquête ménage déplacement doit être constitué et analysé. Cela permettra par la

suite d'employer un échantillonnage stratifié sur des points de départs et d'arrivées représentant chaque usage du cyclisme dans leur bonne proportion.

**Distinction automatique des mises à jour et des mises à niveau dans l'optique d'analyser la fraîcheur d'OSM** La perspective majeure soulevée par ce manuscrit concerne l'analyse de la fraîcheur d'OSM. Le chapitre 3 a mis en avant la différence entre les mises à jour et les mises à niveau. Le chapitre 9 illustre ce problème dans le cadre d'exemples illustratifs réalisés manuellement. Nous avons cherché des articles de presse locale parlant de travaux sur une route donnée ou visualisé des images de la Google Street View à plusieurs dates afin d'identifier approximativement la date d'un changement dans le monde réel. Or nous souhaitons trouver un protocole d'automatisation de ce procédé afin de proposer un indicateur d'actualité d'une zone géographique dans OSM. Nous pourrions nous appuyer sur approche d'intelligence artificielle pour la détection de travaux et autres changements dans les contenus diffusés sur le web (plan d'aménagement, articles de journaux, réseaux sociaux, Panoramax [1], etc.).

Afin de détecter une potentielle mise à niveau dans OSM, une analyse de l'historique des contributions ou d'analyse de la qualité des contributeurs dans le temps pourrait permettre d'identifier les tronçons les plus susceptibles de subir une mise à niveau. Certains travaux analysent la qualité des contributeurs [Arsanjani *et al.* 2013], et pourraient être un socle pour mener à bien ces travaux de recherche, notamment en questionnant la notion d'expertise au cours du temps. Une autre idée pour cette classification est d'utiliser des algorithmes d'apprentissage comme des réseaux de neurones. Certains travaux montrent que ces méthodes fonctionnent pour évaluer la qualité d'OSM [Alghanim *et al.* 2021, Madubedube *et al.* 2021].

Une fois la distinction entre les mises à jour et les mises à niveau faite, nous pouvons analyser la fraîcheur d'OSM. Pour cela, nous pensons qu'une zone géographique donnée disposant de plusieurs vagues de mises à niveau avec des dernières mises à niveau récentes va encore en nécessiter dans le futur proche. Dans cette optique, nous pourrions envoyer une alerte à des contributeurs expérimentés et ayant réalisé des modifications dans cette zone afin de corriger les problèmes encore existants. Au contraire, si de nombreuses mises à niveau ont eu lieu dans une zone dans un intervalle de temps très court ou si la majorité des changements d'une zone sont des mises à jour, alors nous pensons que cette zone dispose d'une bonne fraîcheur et qu'il n'est pas nécessaire d'apporter une attention particulière à celle-ci.

Pour conclure, cette thèse a montré que les BDRM existantes étaient orientées vers un ou deux usages précis (voitures, randonnée). Leur adaptation à un autre usage comme celui du vélo tout en gardant l'information déjà présente nécessite un changement de granularité du tronçon de route vers la voie de circulation.

Les travaux de recherche proposés dans ce manuscrit présentent un modèle conceptuel d'une BDRM contenant une partie de l'information à l'échelle de la voie de circulation. Bien que cette BDRM soit théoriquement instanciable avec la BDTOPO® et OSM, les nombreux problèmes de complétude dans ces deux bases de données ne permet pas un peuplement en utilisant l'une d'elles.

Ensuite, pour évaluer l'évolution d'un réseau cyclable, nous avons proposé une analyse par tronçons de route sur l'ensemble des tronçons d'une grande zone d'étude et une analyse par itinéraires sur des petites zones d'intérêts représentatives de la zone d'étude.

La méthodologie utilisée dans cette thèse est générique et peut être réutilisée pour d'autres usagers secondaires comme les personnes à mobilité réduite.

1. https://panoramax.ign.fr/

# Appendices

Annexe A

# Analyse de l'évolution du réseau cyclable

## A.1 Paramétrage de la distance au réseau

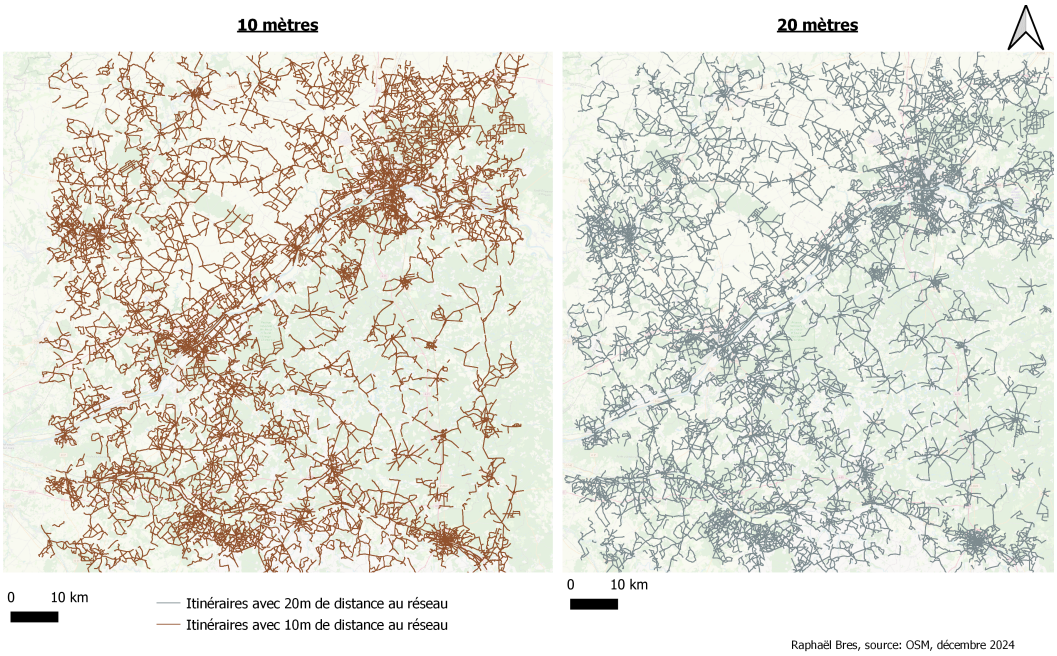



Figure A.1 – Représentation spatiale des itinéraires avec une distance au réseau de 10 et 20 mètres. Test dans une partie de la région Centre Val-de-Loire

## A.2 Analyse par tronçon de route : matrices de confusion

Cette section présente l'ensemble des évolutions de longueur de chaque classe sémantique entre elles entre deux jeux de données consécutifs. le tableau de la période 2018-2019 se trouve dans le manuscrit et les autres tableaux sont présentés ici.




FIGURE A.2 – Représentation spatiale des itinéraires avec une distance au réseau de 50 et 200 mètres. Test dans une partie de la région Centre Val-de-Loire

| 2014 \ 2015 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 90.6% | 0.0% | 0.0% | 5.2% | 0.6% | 0.0% | 3.6% | 100% |
| Bande cyclable | 0.1% | 88.2% | 0.6% | 0.1% | 4.7% | 0.0% | 6.3% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.2% | 91.2% | 0.6% | 7.1% | 0.0% | 1.1% | 100% |
| Réseau piéton | 0.1% | 0.0% | 0.0% | 94.0% | 3.7% | 0.0% | 2.1% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 98.5% | 0.0% | 1.4% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 1.0% | 95.8% | 3.3% | 100% |
| N'existe pas | 0.4% | 0.3% | 0.0% | 3.8% | 93.9% | 1.5% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.4% | 0.3% | 0.2% | 2.8% | 92.5% | 2.6% | 1.2% | 100% |

TABLE A.1 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2014 et 2015

| 2015 \ 2016 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 93.9% | 0.0% | 0.0% | 3.1% | 0.4% | 0.0% | 2.6% | 100% |
| Bande cyclable | 0.0% | 97.7% | 0.0% | 0.1% | 1.4% | 0.0% | 0.8% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.2% | 94.9% | 0.1% | 4.4% | 0.0% | 0.4% | 100% |
| Réseau piéton | 0.3% | 0.0% | 0.0% | 95.6% | 3.3% | 0.0% | 0.8% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.1% | 0.0% | 0.0% | 0.1% | 99.2% | 0.0% | 0.6% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.8% | 98.1% | 1.1% | 100% |
| N'existe pas | 0.9% | 0.1% | 0.0% | 5.6% | 91.1% | 2.4% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.2% | 0.2% | 3.2% | 92.8% | 2.6% | 0.6% | 100% |

TABLE A.2 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2015 et 2016

| 2016 \ 2017 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 87.9% | 0.0% | 0.0% | 4.9% | 2.6% | 0.0% | 4.6% | 100% |
| Bande cyclable | 0.0% | 95.3% | 0.5% | 0.0% | 3.1% | 0.0% | 1.0% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.8% | 98.5% | 0.1% | 0.5% | 0.0% | 0.1% | 100% |
| Réseau piéton | 0.5% | 0.0% | 0.0% | 95.3% | 3.6% | 0.0% | 0.5% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.1% | 0.0% | 0.0% | 99.4% | 0.0% | 0.4% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 99.9% | 0.0% | 100% |
| N'existe pas | 1.0% | 0.2% | 0.0% | 4.9% | 92.9% | 1.1% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.3% | 0.2% | 3.3% | 93.0% | 2.3% | 0.4% | 100% |

TABLE A.3 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2016 et 2017

| 2017 \ 2018 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 96.9% | 0.1% | 0.0% | 1.8% | 0.3% | 0.0% | 0.9% | 100% |
| Bande cyclable | 0.0% | 98.5% | 0.2% | 0.0% | 0.8% | 0.0% | 0.5% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.5% | 86.9% | 0.7% | 11.9% | 0.0% | 0.0% | 100% |
| Réseau piéton | 0.2% | 0.0% | 0.0% | 97.0% | 2.3% | 0.0% | 0.5% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 99.5% | 0.0% | 0.4% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.5% | 99.3% | 0.1% | 100% |
| N'existe pas | 0.3% | 0.1% | 0.0% | 16.7% | 81.9% | 1.0% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.2% | 0.1% | 4.6% | 92.0% | 2.1% | 0.4% | 100% |

TABLE A.4 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2017 et 2018

| 2019 \ 2020 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 86.0% | 0.0% | 0.0% | 6.4% | 0.7% | 0.0% | 6.9% | 100% |
| Bande cyclable | 0.0% | 96.2% | 0.1% | 0.0% | 3.2% | 0.0% | 0.4% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.2% | 89.6% | 0.3% | 9.1% | 0.0% | 0.9% | 100% |
| Réseau piéton | 0.2% | 0.0% | 0.0% | 97.1% | 1.9% | 0.0% | 0.9% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 99.6% | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.7% | 99.2% | 0.1% | 100% |
| N'existe pas | 1.2% | 0.4% | 0.1% | 8.15% | 86.5% | 3.7% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.3% | 0.2% | 5.1% | 91.5% | 2.1% | 0.4% | 100% |

TABLE A.5 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2019 et 2020

| 2020 \ 2021 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 93.5% | 0.1% | 0.0% | 3.6% | 0.4% | 0.0% | 2.4% | 100% |
| Bande cyclable | 0.1% | 97.0% | 0.0% | 0.0% | 1.1% | 0.0% | 1.8% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.1% | 98.2% | 0.1% | 1.5% | 0.0% | 0.1% | 100% |
| Réseau piéton | 0.3% | 0.0% | 0.0% | 97.6% | 1.4% | 0.0% | 0.7% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.1% | 0.0% | 0.1% | 99.3% | 0.0% | 0.5% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.6% | 95.5% | 3.9% | 100% |
| N'existe pas | 2.0% | 0.8% | 0.1% | 12.8% | 83.5% | 0.7% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.5% | 0.3% | 0.2% | 5.3% | 91.2% | 1.9% | 0.6% | 100% |

TABLE A.6 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2020 et 2021

| 2021 \ 2022 | Piste cyclable | Bande cyclable | Voies partagées | Réseau piéton | Réseau des véhicules à moteurs | Interdit | N'existe pas | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Piste cyclable | 88.4% | 0.0% | 0.0% | 9.3% | 1.6% | 0.0% | 0.7% | 100% |
| Bande cyclable | 0.2% | 96.0% | 0.5% | 0.0% | 3.1% | 0.0% | 0.2% | 100% |
| Voies partagées | 0.0% | 0.6% | 92.9% | 0.5% | 5.8% | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Réseau piéton | 0.8% | 0.0% | 0.0% | 96.6% | 1.6% | 0.0% | 1.0% | 100% |
| Réseau des véhicules à moteurs | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 99.6% | 0.0% | 0.3% | 100% |
| Interdit | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.2% | 99.5% | 0.2% | 100% |
| N'existe pas | 1.6% | 0.2% | 0.1% | 16.4% | 81.5% | 0.3% | 0.0% | 100% |
| Total | 0.6% | 0.3% | 0.2% | 5.7% | 91.1% | 1.8% | 0.3% | 100% |

TABLE A.7 – Évolution de la longueur des tronçons de route pour chaque classe sémantique entre 2021 et 2022

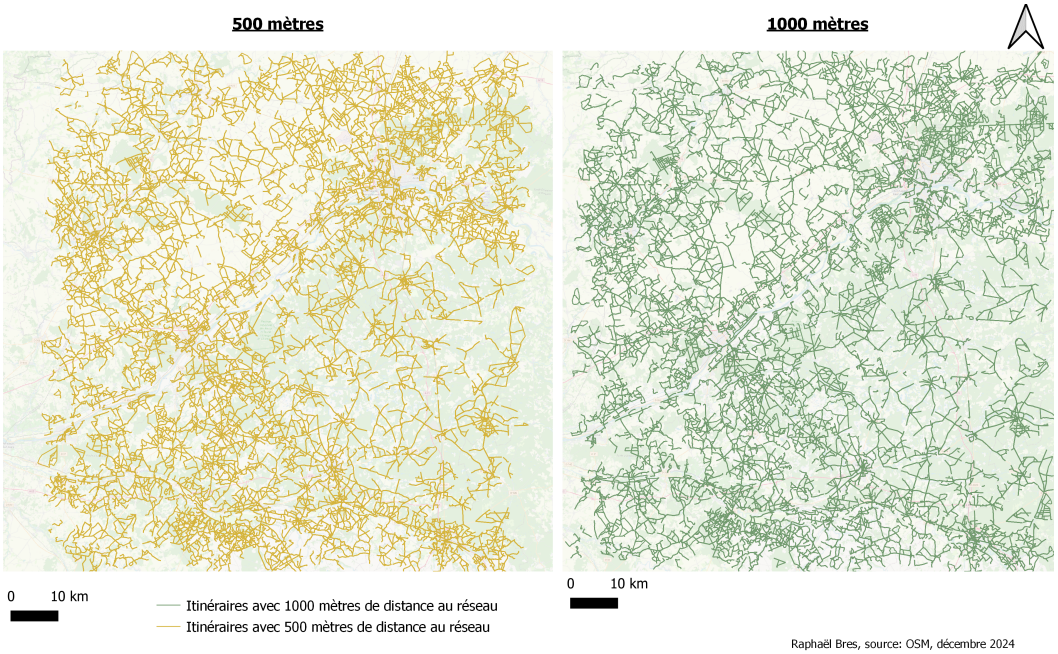



FIGURE A.3 – Représentation spatiale des itinéraires avec une distance au réseau de 500 et 1000 mètres. Test dans une partie de la région Centre Val-de-Loire

## A.3 Analyse par itinéraires : indicateur de centralité pour 2020 et 2021

Dans la section 9.2, deux cartes représentant l'indicateur de centralité sont présentées pour Blois en 2020 et 2021. Cette section d'annexe contient les mêmes cartes avec les mêmes années pour les autres zones d'intérêts.

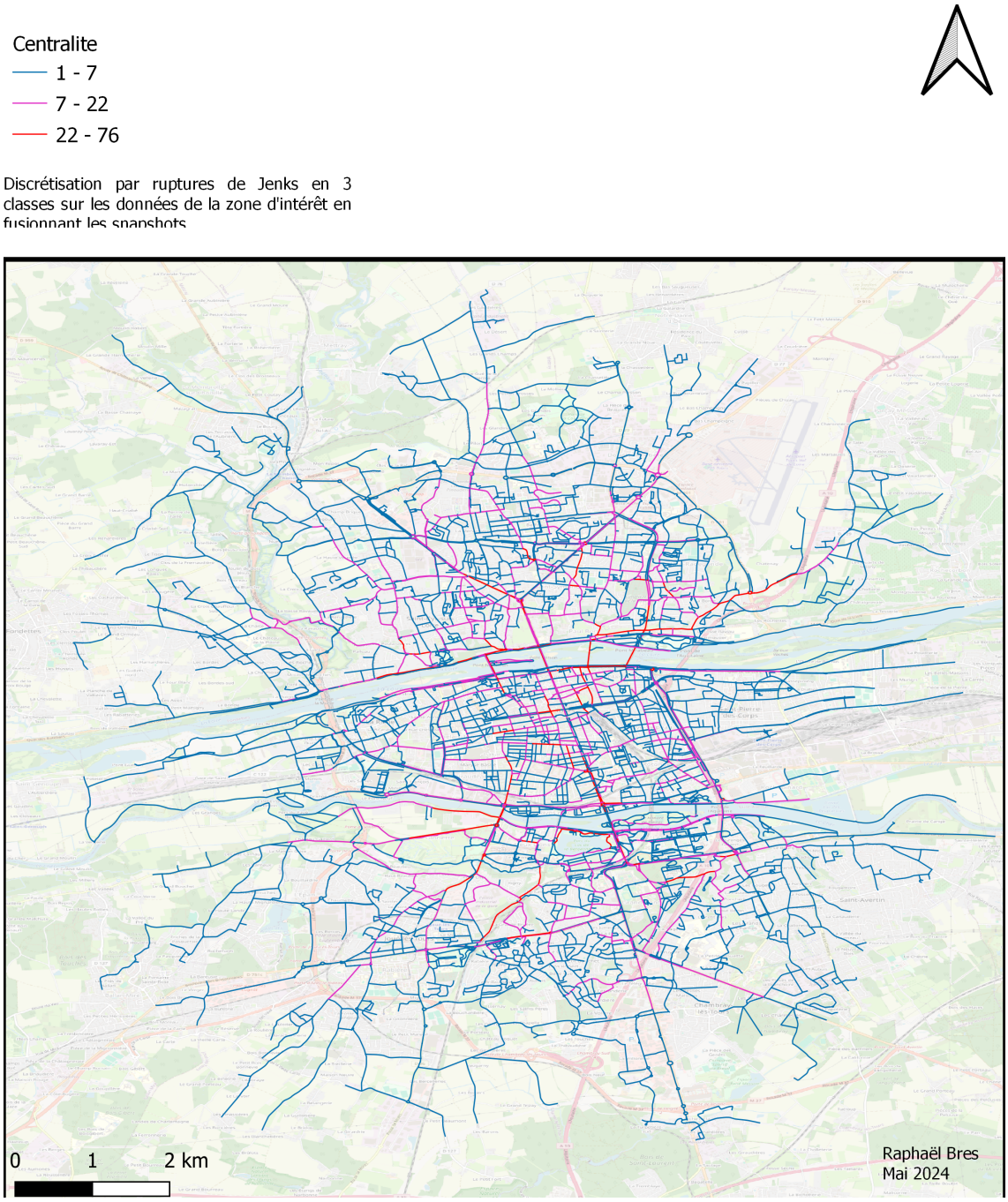



FIGURE A.4 – Centralité des tronçons pour Tours en 2020

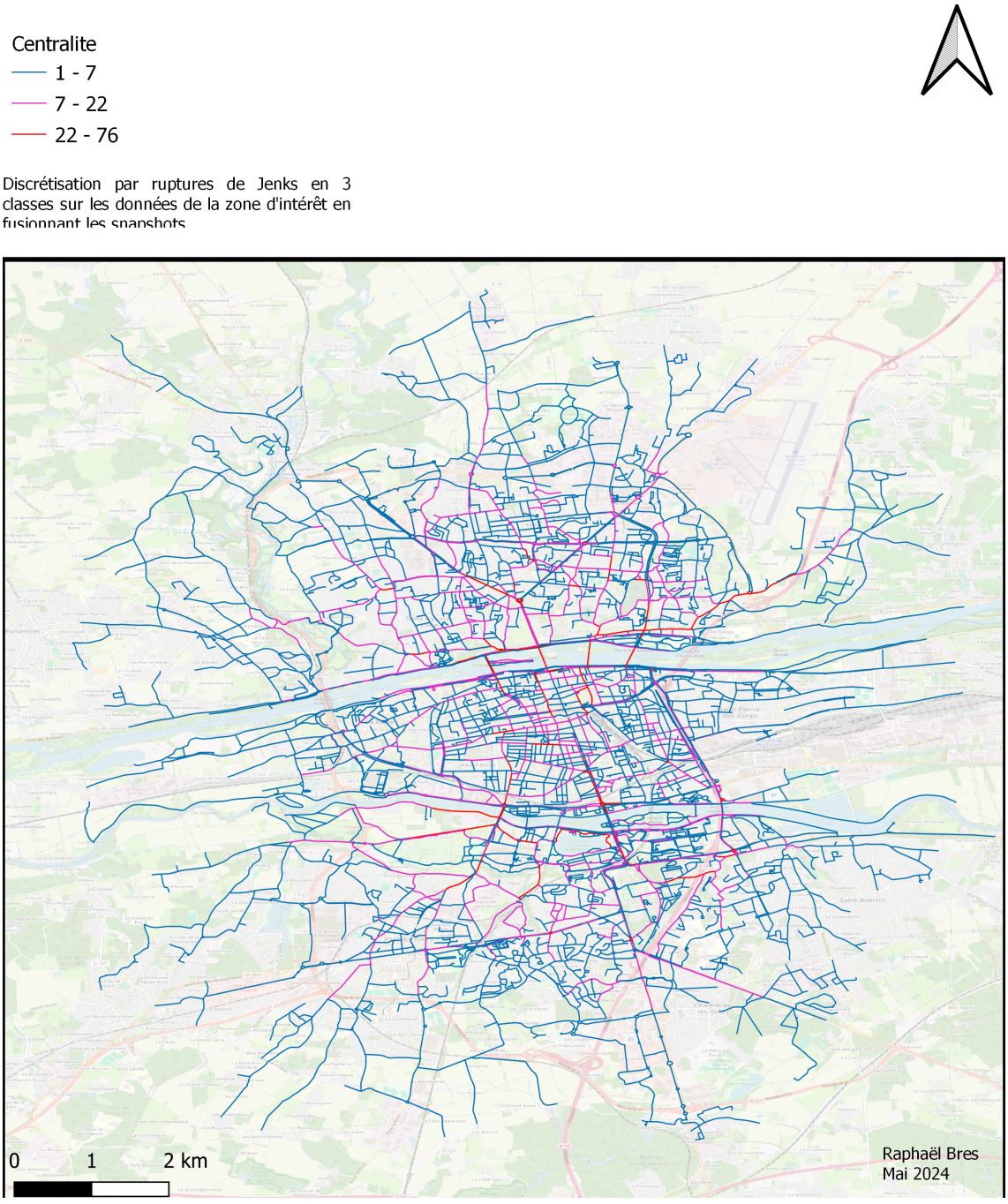



FIGURE A.5 – Centralité des tronçons pour Tours en 2021

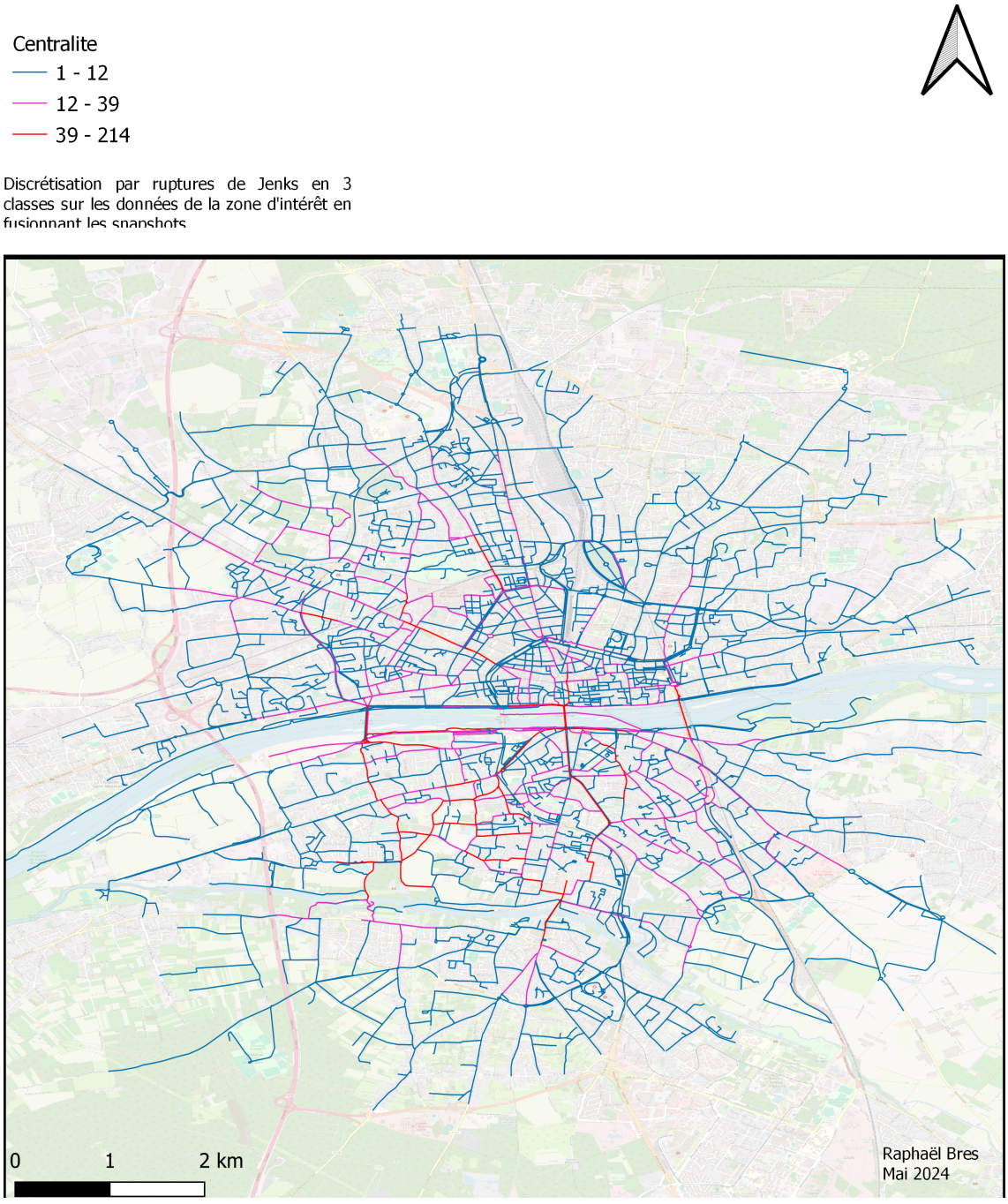



FIGURE A.6 – Centralité des tronçons pour Orléans en 2020

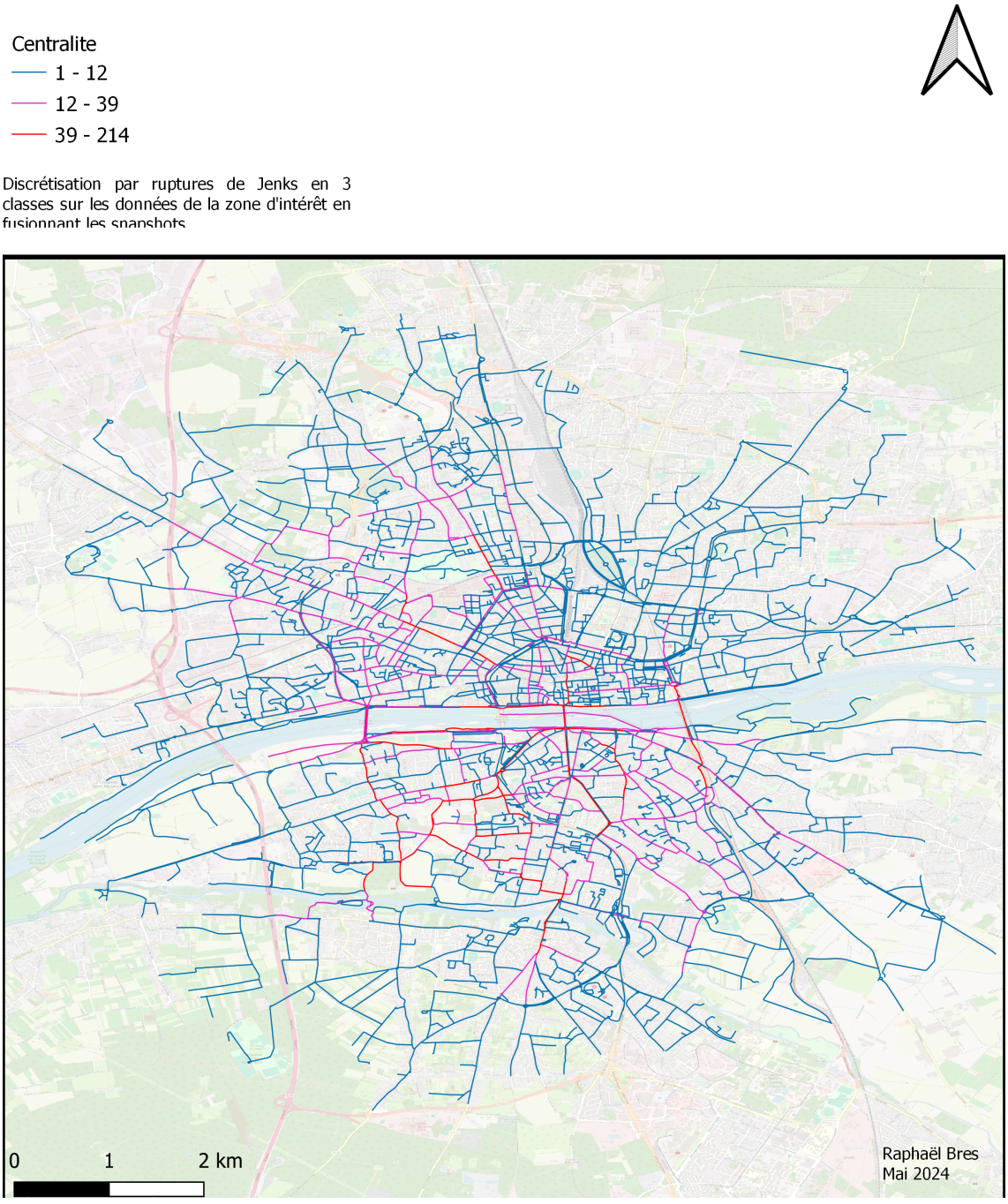



FIGURE A.7 – Centralité des tronçons pour Orléans en 2021

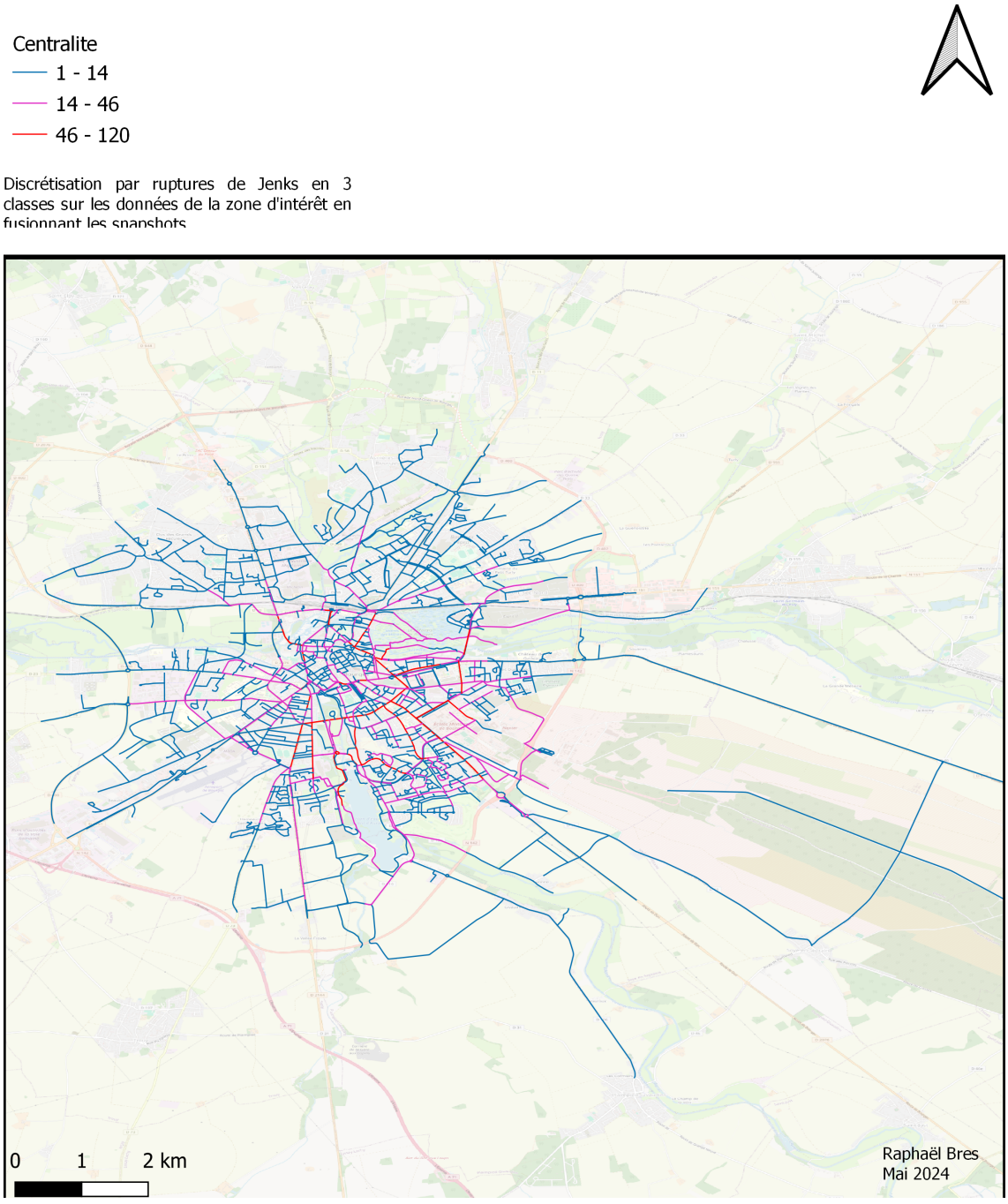



FIGURE A.8 – Centralité des tronçons pour Bourges en 2020

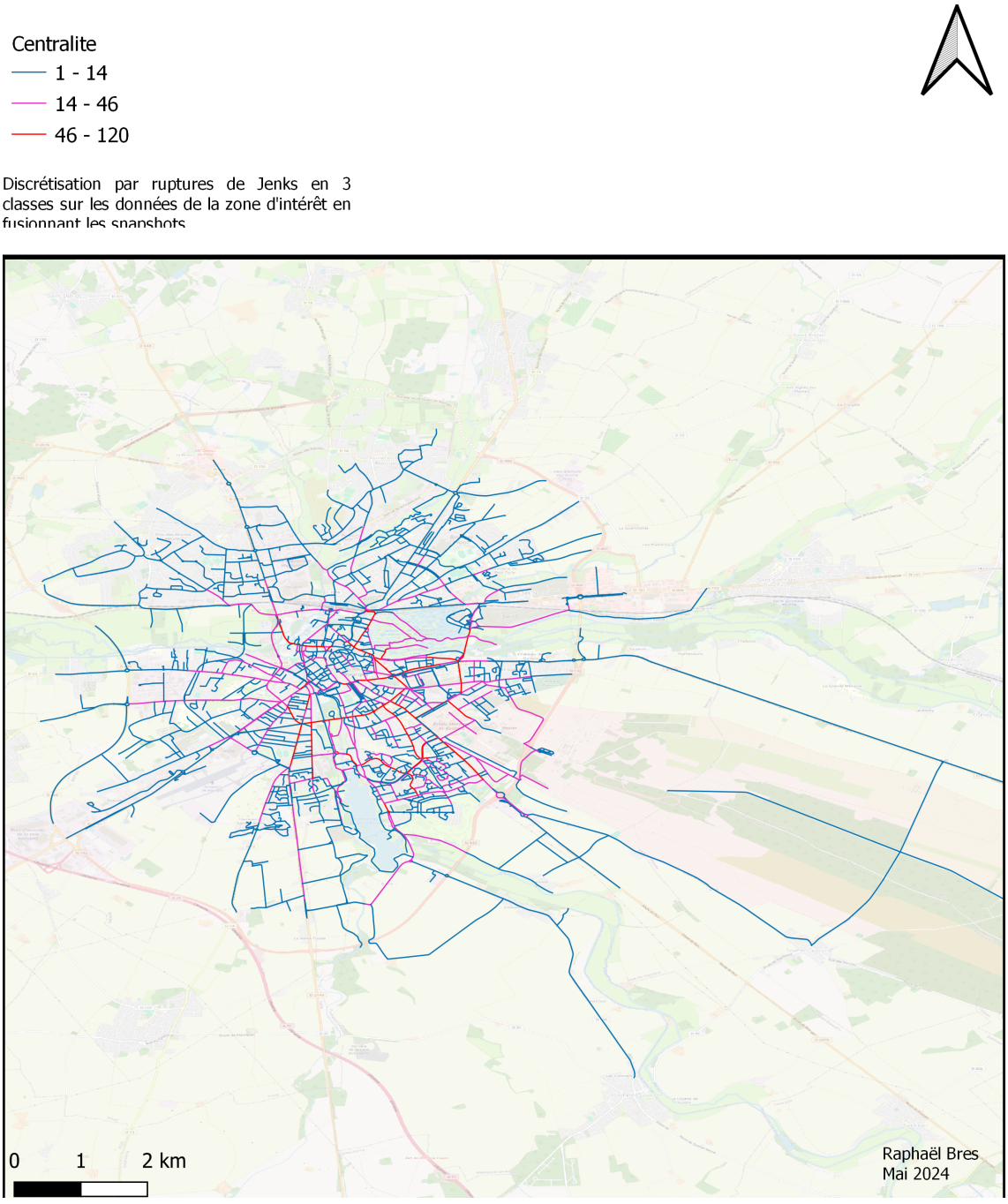



FIGURE A.9 – Centralité des tronçons pour Bourges en 2021

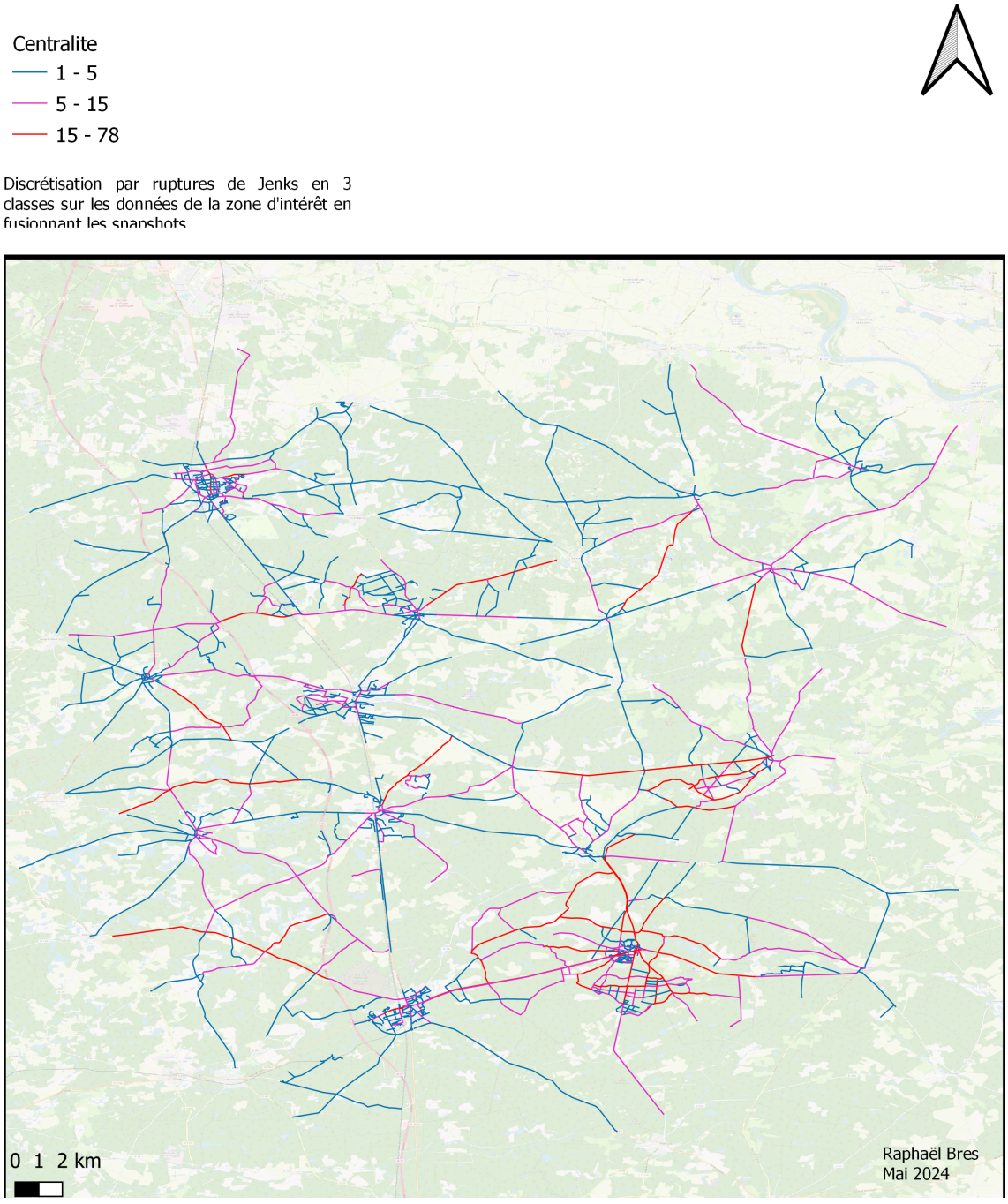



FIGURE A.10 – Centralité des tronçons en Sologne en 2020

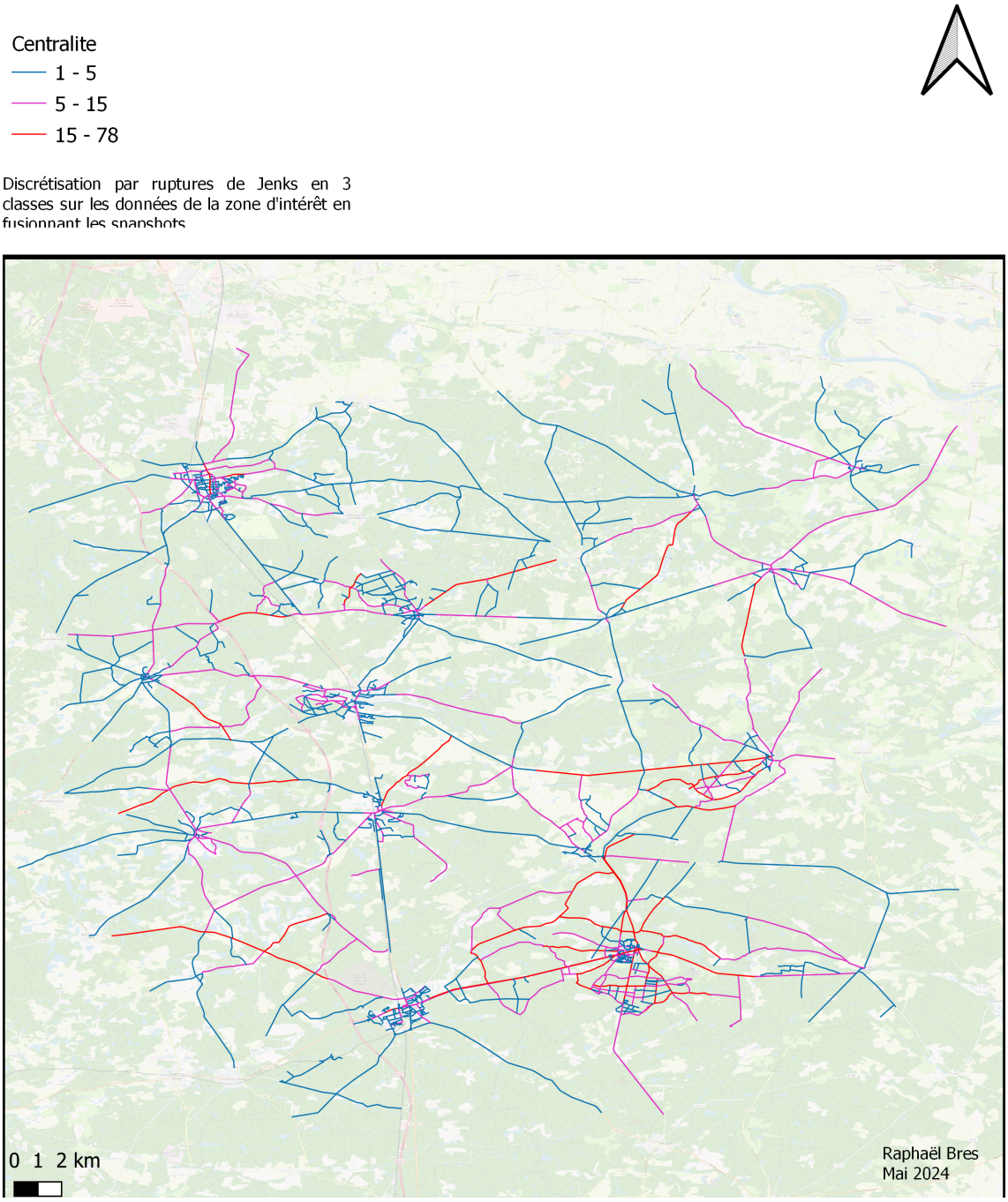



FIGURE A.11 – Centralité des tronçons en Sologne en 2021

## A.3. Analyse par itinéraires : indicateur de centralité pour 2020 et 2021

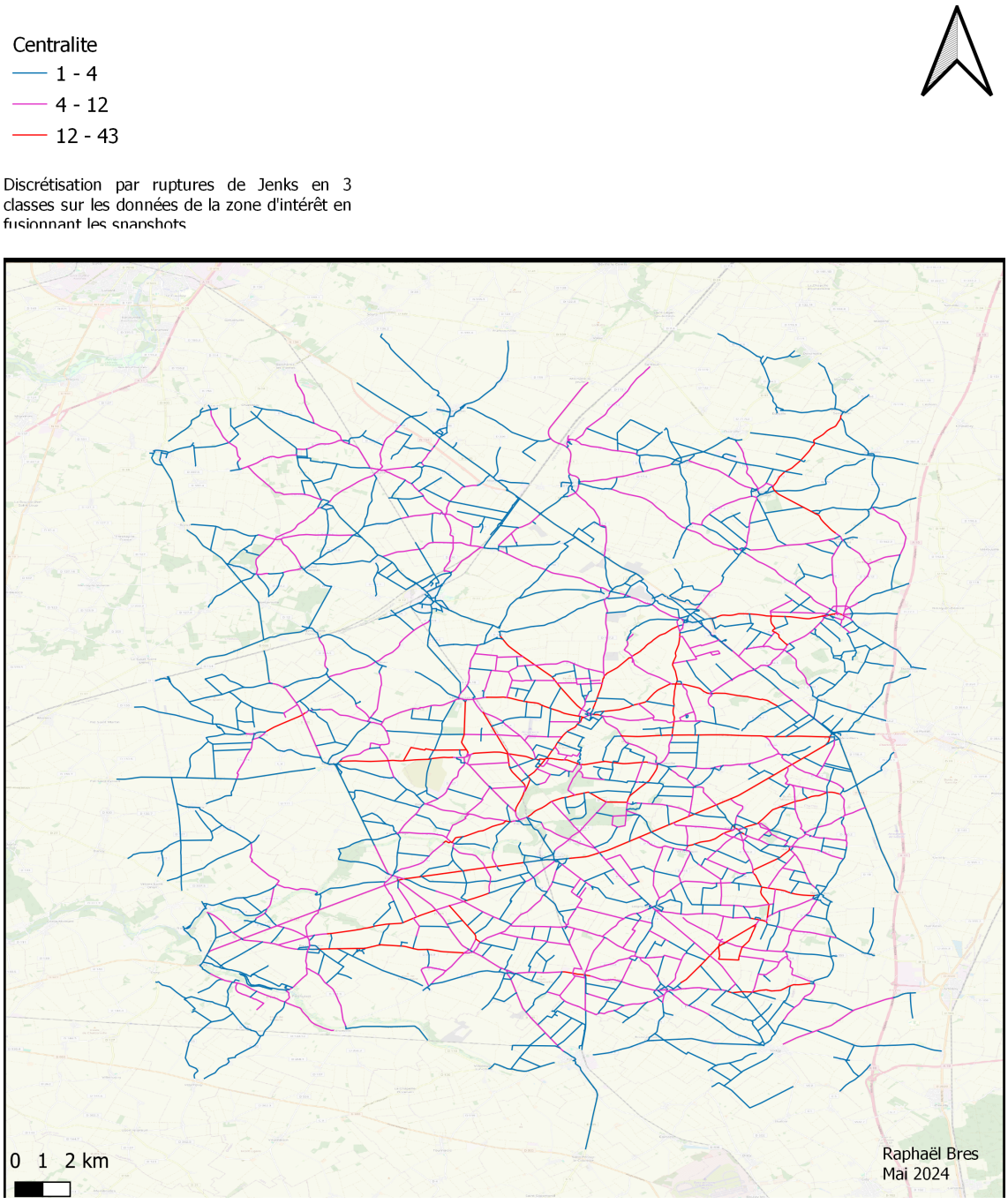



FIGURE A.12 – Centralité des tronçons en Beauce en 2020

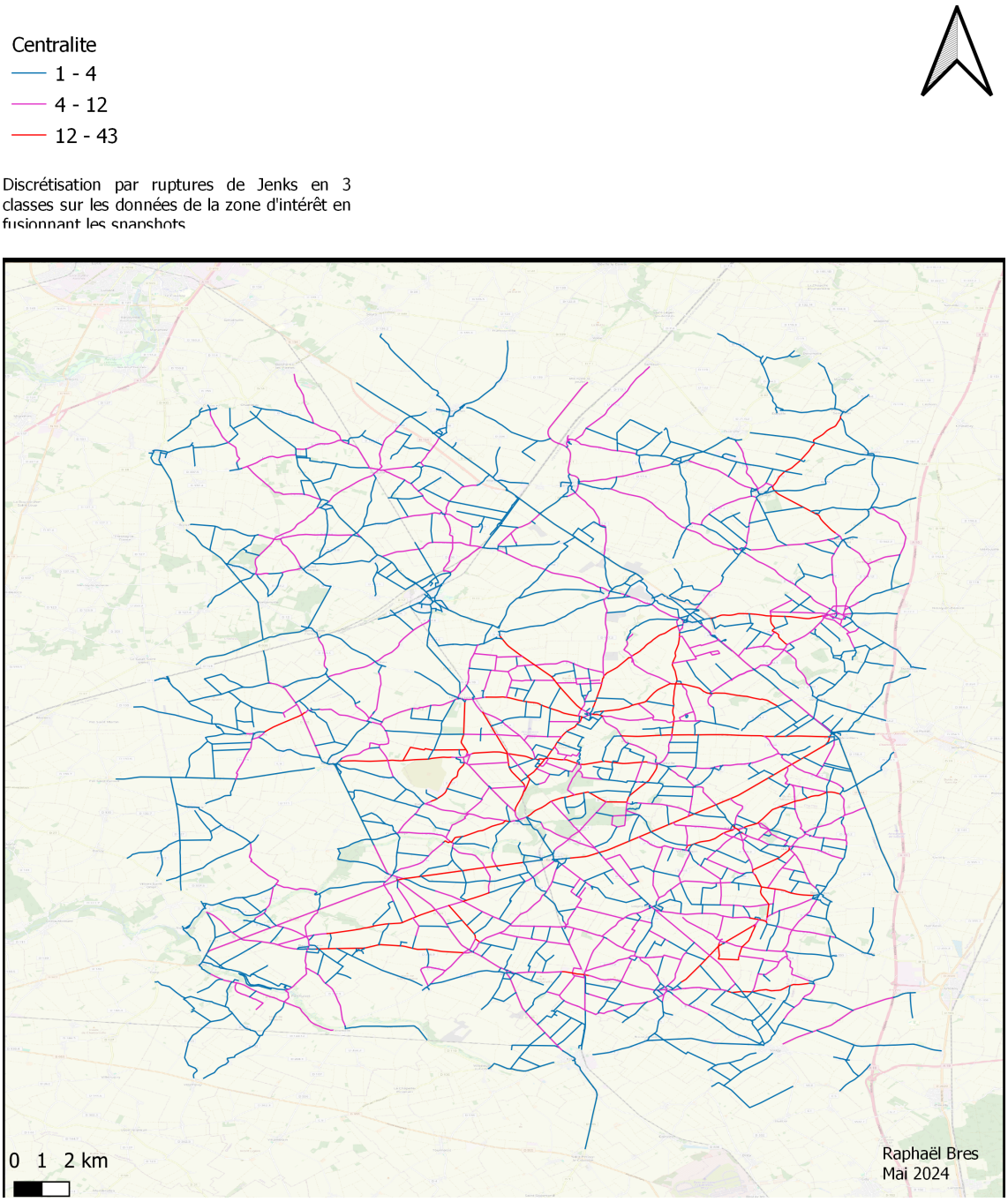



FIGURE A.13 – Centralité des tronçons en Beauce en 2021

Annexe B

# Dictionnaire de la BDRM adaptée au cyclisme

Cette annexe a pour but de regrouper l'ensemble des définitions des classes et attributs de la BDRM adaptée à l'usage cycliste proposée dans le chapitre 6. Chaque section représente une classe et est structurée de la manière suivante : l'introduction de la section donne la définition de la classe et chaque sous-section représente un attribut de la classe concernée.

## B.1 Voie

Une voie de circulation est un espace dédié à la mobilité d'au moins un mode de transport.

**idvoie** idvoie représente l'identifiant unique de chaque voie. Il est composé par l'identifiant du tronçon auquel il est lié, un "_" et le numéro d'ordre de la voie dans le tronçon.

**typeaménagement** typeamenagement représente le type d'infrastructure routière. Il peut prendre comme valeur les différentes classes d'infrastructures cyclables présentées dans le chapitre 5.

**revetement** revetement représente le type de revêtement au sol d'une voie de circulation. Il peut prendre comme valeur "Asphalte ou béton lisse", "Béton bosselé", "Pavés ou bois", "Stabilisé", "Terre, herbe, ou boue", "Chemin rocailleux" ou "Sable".

**vitessemax** vitessemax représente la vitesse maximale autorisée sur la voie. Lorsque plusieurs véhicules sont tolérés sur une voie avec des limitations de vitesse différentes, la limite la plus élevée est retenue. Selon le code de la route français, cet attribut a pour valeur un nombre entier dans l'intervalle $]0, 130]$.

**largeur** largeur représente la largeur de la voie de circulation. C'est un nombre réel positif arrondi au dixième de mètre.

## B.2 Tronçon

Un tronçon est un ensemble de voies qui ne sont pas séparées physiquement. Par exemple, deux voies séparées par de la peinture font partie du même tronçon quand une voie de circulation automobile et un trottoir surélevé forment deux tronçons différents.

**idtronçon** idtronçon représente l'identifiant unique d'un tronçon de route. C'est un nombre entier généré automatiquement.

**geom** geom représente la géométrie du tronçon de route. C'est une géométrie de type linéaire.

**trafic** trafic représente le nombre moyen de voitures par jour empruntant un tronçon. C'est un nombre entier positif ou nul.

**nbAccident** nbAccident compte le nombre d'accidents en un an sur un tronçon donné. C'est un nombre entier positif ou nul.

**bruit** bruit représente la quantité de bruit moyenne observée sur une voie de circulation. C'est un nombre entier positif.

**quantiteEclairage** quantitéEclairage consiste au ratio entre le nombre de lampadaires dans une zone de 2m autour du tronçon divisé par la longueur du tronçon en mètres. C'est un nombre réel positif ou nul.

**qualitéPanorama** qualitéPanorama est une note de la beauté de la vue observée depuis un tronçon. C'est un nombre entier compris dans l'intervalle $[0, 10]$.

**penteMoyenne** penteMoyenne représente la moyenne de la pente pour chaque tronçon dans le sens de numérisation de celui-ci. C'est un nombre réel.

**penteMaximale** penteMaximale représente la pente maximale que peut atteindre un tronçon dans le sens de numérisation de celui-ci. C'est un nombre réel. Nous renseignons la valeur absolue la plus élevée

**directionVent** directionVent représente la direction depuis laquelle le vent a le plus de chances de venir. Les valeurs possibles sont N, NO, O, SO, S, SE, E et NE.

**forceMoyenneVent** forceMoyenneVent représente la force moyenne (km/h) à laquelle souffle le vent sur un tronçon. C'est un nombre réel positif ou nul.

## B.3 Divise

Relation entre les classes voie et tronçon.

**numOrdre** numOrdre représente le numéro de la voie dans son tronçon de route. Le numéro est attribué en donnant le 1 à la voie la plus à droite dans le sens de numérisation du tronçon. Toute voie est prise en compte quelle que soit sa largeur.

## B.4 Itinéraire

Un ensemble de tronçons consécutifs

**idItineraire** idItineraire représente l'identifiant d'un itinéraire. C'est un nombre entier positif généré.

**nomItinéraire** nomItinéraire représente le nom de l'itinéraire. Si l'itinéraire fait partie d'un réseau, c'est son appellation à l'intérieur du réseau qui est retenue.

**niveau** niveau représente l'échelle géographique à laquelle l'itinéraire cyclable permet de se déplacer. Les valeurs possibles sont local, régional, national et international.

**nomReseau** nomReseau représente le nom du réseau dans lequel l'itinéraire est inclus si il en a un.

**estCyclable** estCyclable représente le fait qu'un itinéraire soit principalement cyclable ou non. C'est un booléen qui prend pour valeur vrai si l'itinéraire est cyclable.

## B.5 Fait partie

Relation entre les classes tronçon et itinéraire.

## B.6 Usager

Un usager est un utilisateur du réseau de mobilités.

**idUsager** idUsager représente l'identifiant d'un usager. C'est un nombre entier positif généré.

**nomUsager** nomUsager représente le nom des différents usagers du réseau routier. Les valeurs possibles sont vélo, piéton, voiture, camion, EDPM, métro, tramway, train et bus.

## B.7 Sens

Un sens représente un sens de circulation d'une voie.

**idSens** idSens représente l'identifiant d'un sens de circulation. C'est un nombre entier positif généré.

**nomSens** nomSens représente le nom du sens de circulation. Les valeurs possibles sont direct et inverse.

## B.8 Utilise

Relation entre les classes voie, sens et usager. Il s'agit de la classe centrale du modèle car elle donne les accès aux tronçons aux usagers.

**priorite** priorite représente la priorité dont bénéficie un usager sur une voie dans un sens de circulation. Les valeurs possibles sont adapté, possible, interdit sauf ayant droit, interdit et impossible.

## B.9 Objet ponctuel

La super-classe objet ponctuel contient l'ensemble des attributs en commun à toutes les classes disposant d'une géométrie de type point.

**idObjet** idObjet représente l'identifiant d'objet ponctuel. C'est un nombre entier positif généré.

**geom** geom représente la géométrie des objets ponctuels. C'est une géométrie de type point.

## B.10 Noeud du réseau

Un noeud du réseau est un point se trouvant à une extrémité d'un tronçon et qui marque le changement d'au moins une caractéristique de ce dernier ou une intersection.

**nbAccParAn** nbAccParAn représente le nombre d'accidents par an sur une intersection. C'est un nombre entier positif ou nul.

**croisement** croisement représente le type de croisement dans une intersection. Les valeurs possibles sont "aucun aménagement", "céder le passage", "stop", "feu pour voitures sans M12", "feu pour voitures avec M12", "feu de cyclistes" et "feu de passage piéton".

## B.11 Non communication

Relation entre noeud du réseau et usager représentant une intersection où une impossibilité physique empêche de quitter un tronçon A vers un tronçon B uniquement via cette intersection pour un usager précis.

## B.12 Point d'intérêt

Un point d'intérêt (POI) est un lieu disposant d'une certaine importance selon le point de vue de certaines personnes.

**typePOI** typePOI représente le type du POI. Cela peut être par exemple une boulangerie, un cimetière, un point d'eau, un restaurant...

**nomPOI** nomPOI représente la manière d'appeler un POI. C'est une chaîne de caractères.

**url** url représente un lien vers le site web du POI si il en a un. C'est une chaine de caractères.

**poiCycliste** poiCycliste représente le fait qu'un POI soit utile aux cyclistes. Par exemple, un cimetière qui dans 90% des cas dispose d'un point d'eau potable, est considéré comme cycliste tout comme une boulangerie. Cependant, un cinéma ne sera pas compté comme POI cycliste. C'est une variable booléenne prenant pour valeur vrai quand le POI est cycliste et faux quand il ne l'est pas.

## B.13 Entrave

Une entrave est un objet ponctuel représentant un potentiel danger pour un cycliste.

**typeEntrave** typeEntrave représente le type d'entrave rencontrée par un cycliste. Cela peut être des rails ou un filtre modal par exemple. C'est une chaîne de caractères.

## B.14 Parkings cyclistes

Cette classe regroupe l'ensemble des places de parking attribuées aux cyclistes.

**nbPlaces** nbPlaces représente la capacité d'accueil du parking en nombre de vélos. C'est un nombre entier positif.

**veloPrive** veloPrive représente le type de vélo pouvant utiliser le parking. C'est un booléen ayant pour valeur vrai si le parking est réservé aux vélos d'une entreprise ou d'une collectivité territoriale et faux si il est accessible à tous les vélos.

**ferme** ferme représente le fait qu'un parking soit en plein air ou dans un espace fermé. C'est un booléen ayant pour valeur vrai si le parking est dans un espace fermé et faux si il est en plein air.

**typeAccroche** typeAccroche représente la partie du vélo qui sera accrochée au mobilier du parking. Les valeurs possibles sont "roue", "cadre et roue" et "sans accroche".

**mobilier** mobilier représente le système d'accrochage du vélo mis en place dans le parking. Les valeurs possibles sont "arceau", "crochet", "ratelier", "rack double étage" et "autre".

**surveillance** surveillance représente le niveau de gardiennage du parking. C'est un booléen ayant pour valeur vrai si le parking dispose d'un gardien de surveillance ou de caméras et faux dans le cas où aucun des deux équipements n'est présent.

**lumiere** lumiere représente le fait qu'un parking vélo dispose d'un éclairage. C'est un booléen ayant pour valeur vrai si le parking est éclairé et faux sinon. Un parking éclairé implique l'éclairage d'un lampadaire pour un parking ouvert et par un éclairage intérieur pour un parking fermé.

## B.15 Modification

Modification représente la classe contenant les attributs communs aux ajouts d'objets, suppressions d'objets et modifications d'attributs.

**idChangement** idChangement représente l'identifiant du changement. C'est un nombre entier positif généré.

**nomTable** nomTable représente le nom de la table de la BDRM qui subit le changement. C'est une chaîne de caractères.

**datemaj** datemaj représente la date au format "jj/mm/yyyy hh-mm-ss" à laquelle le changement a eu lieu.

**sourceChangement** sourceChangement représente la BDRM qui a servi de source pour la nouvelle version de l'objet ayant subi le changement. C'est une chaîne de caractères.

**idObjetSource** idObjetSource représente l'identifiant d'un objet dans sa BDRM d'origine. Tous les identifiants sont convertis en chaînes de caractères.

**versionObjetSource** versionObjetSource représente le numéro de version d'un objet dans sa BDRM d'origine. Dans le cadre d'une BDRM millésimée comme la BD TOPO®, le mois suivi de l'année du millésime représentent la version de l'objet.

**idObjet** idObjet représente l'identifiant de l'objet dans la BDRM. C'est un nombre entier positif.

## B.16 creationObjet

Cette classe regroupe l'ensemble des créations d'objets dans la BDRM.

## B.17 Suppression

Cette classe regroupe l'ensemble des suppressions d'objets.

## B.18 Changement attribut

Cette classe regroupe l'ensemble des modifications d'attributs apportées aux objets de la BDRM. Un seul changement d'attribut est réalisé par ligne dans cette table.

**nomAttribut** nomAttribut représente le nom de l'attribut modifié. C'est une chaîne de caractères.

**ancienneValeur** ancienneValeur représente le contenu de l'ancienne valeur de l'attribut modifié. C'est une chaîne de caractères.

**nouvelleValeur** nouvelleValeur représente le contenu de la nouvelle valeur de l'attribut modifié. C'est une chaîne de caractères.

Annexe C

# Tableaux complets du chapitre 7

Table C.1 – Remplissage de la table *voie* à partir de l'exemple 1 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Attributs / Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 0_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 3 |
| 2 | 2_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 2_2 | routier | asphalte | 3 |
| 3 | 3_1 | chemin | gravel | 1 |
| 4 | 4_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 4_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 4_3 | routier | asphalte | 3 |
| 5 | 5_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_3 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_4 | routier | asphalte | 3 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| 7 | 7_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 7_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 7_3 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 7_4 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| 8 | 8_1 | zone de rencontre | asphalte | 2.5 |

TABLE C.2 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 1 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 0_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 0_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 1_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 2_1 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 2_2 | Interdit | Toléré | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 4_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 4_2 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 4_3 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 7_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 7_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 7_4 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |

TABLE C.3 – Remplissage de la table voie à partir de l'exemple 1, version 2 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 3 |
| 2 | 2_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 2_2 | routier | asphalte | 3 |
| 3 | 3_1 | chemin | gravel | 1 |
| 4 | 4_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 4_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 4_3 | routier | asphalte | 3 |
| 5 | 5_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_3 | routier | asphalte | 3 |
| | 5_4 | routier | asphalte | 3 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| 7 | 7_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 7_3 | routier | asphalte | 2.5 |
| 8 | 8_1 | zone de rencontre | asphalte | 2.5 |
| 9 | 9_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 9_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 10 | 10_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 10_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 11 | 11_1 | piste cyclable | asphalte | |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |

TABLE C.4 – Remplissage de la relation utilise à partir de l'exemple 1, version 2 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 1_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 2_1 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 2_2 | Interdit | Toléré | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 4_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 4_2 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 4_3 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 7_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |
| 9_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 9_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 10_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 10_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 11_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Impossible | Impossible |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Impossible | Impossible |

TABLE C.5 – Remplissage de la table voie à partir de l'exemple 2 adapté à la BDTOPO®

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 2 | 2_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 2_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 3 | 3_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 3_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 4 | 4_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 4_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 5 | 5_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 6_2 | routier | asphalte | 3 |
| 7 | 7_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 7_2 | routier | asphalte | 3 |
| 8 | 8_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 8_2 | routier | asphalte | 3 |
| 9 | 9_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 9_2 | routier | asphalte | 3 |
| 10 | 10_1 | routier | asphalte | 3 |
| 11 | 11_1 | routier | asphalte | 3 |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 13 | 13_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 13_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 14 | 14_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 14_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 15 | 15_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 15_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 16 | 16_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 16_2 | routier | asphalte | 3 |
| 17 | 17_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 17_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 18 | 18_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 18_2 | routier | asphalte | 3 |
| 19 | 19_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 19_2 | routier | asphalte | 3.5 |
| | 19_3 | routier | asphalte | 3.5 |
| | 19_4 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| 20 | 20_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 20_2 | routier | asphalte | 4 |
| | 20_3 | bande cyclable | asphalte | 1 |

Table C.6 – Remplissage de la relation utilise à partir de l'exemple 2 adapté à la BDTOPO®

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 1_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 2_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 2_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 3_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 3_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 4_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 4_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 8_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 8_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 9_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 9_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 10_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 11_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 12_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 13_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 13_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 14_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 14_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 15_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 15_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 16_1 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 16_2 | Interdit | Toléré | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 17_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 17_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 18_1 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 18_2 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 19_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 19_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 19_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 19_4 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 20_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré | Interdit |
| 20_2 | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté |
| 20_3 | Interdit | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré |

TABLE C.7 – Remplissage de la relation *utilise* à partir de l'exemple 1 adapté à OSM

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 0_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 0_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 1_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 2_1 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 2_2 | Interdit | Toléré | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 3_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Impossible | Impossible |
| 4_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 4_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 4_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 5_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 5_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_4 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 6_1 | Toléré | Toléré | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 7_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 7_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 7_4 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 8_1 | Toléré | Toléré | Adapté | Adapté | Toléré | Toléré |

TABLE C.8 – Remplissage de la table voie à partir de l'exemple 2 adapté à OSM

| Identifiants tronçons | Identifiants voies | typeAmenagement | revetement | largeur |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 1_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 2 | 2_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 2_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 3 | 3_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 3_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 4 | 4_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 4_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 5 | 5_1 | routier | asphalte | 2.5 |
| | 5_2 | routier | asphalte | 2.5 |
| 6 | 6_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 6_2 | routier | asphalte | 3 |
| 7 | 7_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 7_2 | routier | asphalte | 3 |
| 8 | 8_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 8_2 | routier | asphalte | 3 |
| 9 | 9_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 9_2 | routier | asphalte | 3 |
| 10 | 10_1 | routier | asphalte | 3 |
| 11 | 11_1 | routier | asphalte | 3 |
| 12 | 12_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_2 | piste cyclable | asphalte | |
| | 12_3 | piéton | asphalte | |
| 13 | 13_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 13_2 | piste cyclable | asphalte | |
| | 13_3 | piéton | asphalte | |
| 14 | 14_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 14_2 | piste cyclable | asphalte | |
| | 14_3 | piéton | asphalte | |
| 15 | 15_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 15_2 | piste cyclable | asphalte | |
| | 15_3 | piéton | asphalte | |
| 16 | 16_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 16_2 | routier | asphalte | 3 |
| 17 | 17_1 | piste cyclable | asphalte | |
| | 17_2 | piste cyclable | asphalte | |
| 18 | 18_1 | routier | asphalte | 3 |
| | 18_2 | routier | asphalte | 3 |
| 19 | 19_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 19_2 | routier | asphalte | 3.5 |
| | 19_3 | routier | asphalte | 3.5 |
| | 19_4 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| 20 | 20_1 | bande cyclable | asphalte | 1 |
| | 20_2 | routier | asphalte | 4 |
| | 20_3 | bande cyclable | asphalte | 1 |

TABLE C.9: Remplissage de la relation utilise à partir de l'exemple 2 adapté à OSM

| Usager | vélo | | piéton | | voiture | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sens / id_voie | direct | inverse | direct | inverse | direct | inverse |
| 1_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 1_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 2_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 2_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 3_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 3_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 4_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 4_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 5_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 6_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 7_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 8_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 8_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 9_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 9_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 10_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 11_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 12_1 | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 12_2 | Interdit | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 12_3 | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté | Interdit | Interdit |
| 13_1 | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 13_2 | Interdit | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 13_3 | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté | Interdit | Interdit |
| 14_1 | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 14_2 | Interdit | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 14_3 | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté | Interdit | Interdit |
| 15_1 | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 15_2 | Interdit | Adapté | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit |
| 15_3 | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté | Interdit | Interdit |
| 16_1 | Toléré | Interdit | Toléré | Toléré | Adapté | Interdit |
| 16_2 | Interdit | Toléré | Toléré | Toléré | Interdit | Adapté |
| 17_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 17_2 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 18_1 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 18_2 | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 19_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 19_2 | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté | Interdit |
| 19_3 | Interdit | Toléré | Interdit | Interdit | Interdit | Adapté |
| 19_4 | Interdit | Adapté | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit |
| 20_1 | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré | Interdit |
| 20_2 | Toléré | Toléré | Interdit | Interdit | Adapté | Adapté |
| 20_3 | Interdit | Adapté | Interdit | Toléré | Interdit | Toléré |

# Bibliographie


[Abu-Ryash & Tamimi 2015] Hanaa M Abu-Ryash and Dr Abdelfatah A Tamimi. *Comparison Studies for Different Shortest path Algorithms*. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY, 2015. (Cité à la page 53.)

[Ahmed *et al.* 2024] Tufail Ahmed, Ali Pirdavani, Geert Wets and Davy Janssens. *Bicycle Infrastructure Design Principles in Urban Bikeability Indices : A Systematic Review*. Sustainability, vol. 16, no. 6, page 2545, January 2024. Number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité aux pages 21, 22, 23, 56, 90 et 93.)

[Akoka *et al.* 2007] J Akoka, L Berti-Équille, O Boucelma, M Bouzeghoub, I Comyn-Wattiau, M Cosquer, V Goasdoué-Thion, Z Kedad, S Nugier, V Peralta and S Sisaid-Cherfi. *A FRAMEWORK FOR QUALITY EVALUATION IN DATA INTEGRATION SYSTEMS*. Dans Proceedings of the Ninth International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 3 : ICEIS, 2007. (Cité à la page 35.)

[Alghanim *et al.* 2021] Amerah Alghanim, Musfira Jilani, Michela Bertolotto and Gavin McArdle. *Leveraging Road Characteristics and Contributor Behaviour for Assessing Road Type Quality in OSM*. ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 10, no. 7, page 436, July 2021. Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité aux pages 41 et 184.)

[Allen *et al.* 2021] Julian Allen, Maja Piecyk, Tom Cherrett, Muhammad Nabil Juhari, Fraser McLeod, Marzena Piotrowska, Oliver Bates, Tolga Bektas, Kostas Cheliotis, Adrian Friday and Sarah Wise. *Understanding the transport and CO2 impacts of on-demand meal deliveries : A London case study*. Cities, vol. 108, page 102973, January 2021. (Cité à la page 19.)

[Arantxa 2000] Julien Arantxa. *Comparaison des principaux manuels européens d'aménagements cyclables : aménagement cyclable et espace urbain*. Technical report, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), 2000. (Cité aux pages 18 et 69.)

[Ardizzoni *et al.* 2024] Stefano Ardizzoni, Mattia Laurini, Rafael Praxedes, Luca Consolini and Marco Locatelli. *Identification of Cyclists' Route Choice Criteria*. Technical report arXiv :2403.16580, arXiv, March 2024. arXiv :2403.16580 [math] type : article. (Cité à la page 23.)

[Arellana *et al.* 2020] Julián Arellana, María Saltarín, Ana Margarita Larrañaga, Virginia I. González and César Augusto Henao. *Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments*. Transportation Research Part A : Policy and Practice, vol. 139, pages 310–334, September 2020. (Cité à la page 22.)

[Arora *et al.* 2017] Sonali Arora, Sukhjit Singh Sehra and Sumeet Kaur Sehra. *Design and Development of tool for assessing OpenStreetMap Completeness*. International Journal of Computer Sciences and Engineering, vol. 5, no. 8, pages 79–87, August 2017. (Cité à la page 40.)

[Arsanjani *et al.* 2013] Jamal Jokar Arsanjani, Christopher Barron, Mohammed Bakillah and Marco Helbich. *Assessing the Quality of OpenStreetMap Contributors together with their Contributions*. Dans Proceedings of 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science, page 4, 2013. (Cité aux pages 42 et 184.)

[Arsanjani *et al.* 2015] Jamal Jokar Arsanjani, Peter Mooney, Marco Helbich and Alexander Zipf. *An Exploration of Future Patterns of the Contributions to OpenStreetMap and Development of a Contribution Index*. Transactions in GIS, vol. 19, no. 6, pages 896–914, 2015. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tgis.12139. (Cité à la page 40.)

[Banerjee *et al.* 2022] Apara Banerjee, Mirosława Łukawska, Anders Fjendbo Jensen and Sonja Haustein. *Facilitating bicycle commuting beyond short distances : insights from existing literature.* Transport Reviews, vol. 42, no. 4, pages 526–550, July 2022. (Cité aux pages 79 et 159.)

[Barnett 1974] Vic Barnett. Elements of sampling theory. London : English Universities Press, 1974. (Cité aux pages 57 et 58.)

[Barron *et al.* 2014] Christopher Barron, Pascal Neis and Alexander Zipf. *A Comprehensive Framework for Intrinsic OpenStreetMap Quality Analysis.* Transactions in GIS, vol. 18, no. 6, pages 877–895, 2014. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tgis.12073. (Cité aux pages 38 et 40.)

[Batini & Scannapieca 2006] Carlo Batini and Monica Scannapieca. *Data Quality Dimensions.* Dans Carlo Batini and Monica Scannapieca, editors, Data Quality : Concepts, Methodologies and Techniques, pages 19–49. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. (Cité aux pages 34 et 38.)

[Bellman 1958] Richard Bellman. *On a routing problem.* Quarterly of Applied Mathematics, vol. 16, no. 1, pages 87–90, 1958. (Cité à la page 55.)

[Bissel & Becker 2024] Michael Bissel and Sophia Becker. *Can cargo bikes compete with cars ? Cargo bike sharing users rate cargo bikes superior on most motives – Especially if they reduced car ownership.* Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour, vol. 101, pages 218–235, February 2024. (Cité à la page 20.)

[Bixhaku *et al.* 2023] Mevlan Bixhaku, Gëzim Hoxha and Ramadan Duraku. *Analysis of Perceptions of Cycling Safety on Roads with Mixed Traffic Depending on Age, Gender, and Riding Experience.* Civil Engineering Journal, vol. 9, 2023. (Cité à la page 81.)

[Boccaletti *et al.* 2014] S. Boccaletti, G. Bianconi, R. Criado, C.I. del Genio, J. Gómez-Gardeñes, M. Romance, I. Sendiña-Nadal, Z. Wang and M. Zanin. *The structure and dynamics of multilayer networks.* Physics Reports, vol. 544, no. 1, pages 1–122, November 2014. (Cité à la page 51.)

[Bovee *et al.* 2003] Matthew Bovee, Rajendra P Srivastava and Brenda Mak. *A Conceptual Framework and Belief-Function Approach to Assessing Overall Information Quality.* International Journal of Intelligent Systems, 2003. (Cité à la page 35.)

[Bres *et al.* 2022] R. Bres, V. Peralta, A. Le-Guilcher, T. Devogele, A-M. Olteanu-Raimond and C. de Runz. *Spécification et qualité du réseau cyclable, application à la recherche d'itinéraires.* Dans INFORSID, 2022. (Cité aux pages 28, 39, 76, 176 et 180.)

[Bres *et al.* 2023] Raphaël Bres, Veronika Peralta, Arnaud Le-Guilcher, Thomas Devogele, Ana-Maria Olteanu Raimond and Cyril de Runz. *Analysis of cycling network evolution in OpenStreetMap through a data quality prism.* AGILE : GIScience Series, vol. 4, pages 1–9, June 2023. (Cité aux pages 143, 151, 158 et 180.)

[Bres *et al.* 2024] Raphaël Bres, Veronika Peralta, Arnaud Le-Guilcher, Thomas Devogele, Ana-Maria Olteanu Raimond and Cyril de Runz. *Network evolution analysis : a usage-centric approach applied on cycling cycling infrastructures.* 2024. En cours de révision dans le journal JOSIS. (Cité aux pages 143, 146, 151, 163, 180 et 181.)

[Brezina *et al.* 2022] Tadej Brezina, Helmut Lemmerer and Ulrich Leth. *Mental barriers in planning for cycling along the urban–rural gradient.* Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. 16, page 100689, December 2022. (Cité à la page 1.)

[Buehler & Pucher 2017] Ralph Buehler and John Pucher. *Trends in Walking and Cycling Safety : Recent Evidence From High-Income Countries, With a Focus on the United States and Germany.* American Journal of Public Health, vol. 107, no. 2, pages 281–287, February 2017. (Cité à la page 81.)

[Chang & Nichols 2006] Noah Chang and Jenny Nichols. *Introduction to Graph Theory*, 2006. (Cité à la page 48.)

[Chu *et al.* 2019] Xiaokai Chu, Xinxin Fan, Di Yao, Zhihua Zhu, Jianhui Huang and Jingping Bi. *Cross-Network Embedding for Multi-Network Alignment.* Dans The World Wide Web Conference, WWW '19, pages 273–284, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery. (Cité à la page 51.)

[Ciepłuch *et al.* 2010] Błażej Ciepłuch, Ricky Jacob, Peter Mooney and Adam C. Winstanley. *Comparison of the accuracy of OpenStreetMap for Ireland with Google Maps and Bing Maps.* Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resuorces and Enviromental Sciences 20-23rd July 2010, page 337, July 2010. Publisher : University of Leicester. (Cité à la page 28.)

[Cole-Hunter *et al.* 2015] T. Cole-Hunter, D. Donaire-Gonzalez, A. Curto, A. Ambros, A. Valentin, J. Garcia-Aymerich, D. Martínez, L. M. Braun, M. Mendez, M. Jerrett, D. Rodriguez, A. de Nazelle and M. Nieuwenhuijsen. *Objective correlates and determinants of bicycle commuting propensity in an urban environment.* Transportation Research Part D : Transport and Environment, vol. 40, pages 132–143, October 2015. (Cité à la page 79.)

[Cooke & Halsey 1966] Kenneth L Cooke and Eric Halsey. *The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times.* Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol. 14, no. 3, pages 493–498, June 1966. (Cité à la page 56.)

[Costes *et al.* 2015] Benoit Costes, Julien Perret, Bénédicte Bucher and Maurizio Gribaudi. *An aggregated graph to qualify historical spatial networks using temporal patterns detection.* Dans The 18th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Lisbon, Portugal, 2015. (Cité aux pages 50 et 51.)

[Dale & Fortin 2010] M. R. T. Dale and M.-J. Fortin. *From Graphs to Spatial Graphs.* Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, vol. 41, no. Volume 41, 2010, pages 21–38, December 2010. Publisher : Annual Reviews. (Cité à la page 48.)

[Del Mondo *et al.* 2010] Géraldine Del Mondo, John Stell, Christophe Claramunt and rémy Thibaud. *A Graph Model for Spatio-temporal Evolution.* J. UCS, vol. 16, pages 1452–1477, January 2010. (Cité à la page 50.)

[Delling *et al.* 2017] Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, Thomas Pajor and Renato F. Werneck. *Customizable Route Planning in Road Networks.* Transportation Science, vol. 51, no. 2, pages 566–591, May 2017. Publisher : INFORMS. (Cité à la page 55.)

[Denardo & Fox 1979] Eric V. Denardo and Bennett L. Fox. *Shortest-Route Methods : 1. Reaching, Pruning, and Buckets.* Operations Research, vol. 27, no. 1, pages 161–186, February 1979. Publisher : INFORMS. (Cité à la page 55.)

[Derman & Keles 2023] Engin Derman and Hüseyin Keles. *A Conceptual Evaluation of Cycling Tourism in the Context of Sustainable Tourism.* Journal of Tourism & Gastronomy Studies, vol. 11, no. 2, pages 1382–1394, July 2023. Number : 2. (Cité aux pages 3 et 19.)

[Dial *et al.* 1979] R. Dial, F. Glover, D. Karney and D. Klingman. *A computational analysis of alternative algorithms and labeling techniques for finding shortest path trees.* Networks, vol. 9, no. 3, pages 215–248, 1979. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/net.3230090304. (Cité à la page 56.)

[Dijkstra 1959] E W Dijkstra. *A note on two problems in connexion with graphs.* Numerische Mathematik, 1959. (Cité à la page 53.)

[Dill & McNeil 2012] Jennifer Dill and Nathan McNeil. *FOUR TYPES OF CYCLISTS ?*, 2012. (Cité à la page 19.)

[Dorn *et al.* 2015] Helen Dorn, Tobias Törnros and Alexander Zipf. *Quality Evaluation of VGI Using Authoritative Data—A Comparison with Land Use Data in Southern Germany.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 4, no. 3, pages 1657–1671, September 2015. Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 42.)

[Ek 2021] Kristina Ek. *Motives for walking and cycling when commuting – differences in local contexts and attitudes.* European Transport Research Review, 2021. (Cité à la page 19.)

[Eldar 2015] Yonina C. Eldar. Sampling Theory : Beyond Bandlimited Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 2015. (Cité à la page 57.)

[Emran 2015] Nurul A. Emran. *Data Completeness Measures.* Dans Ajith Abraham, Azah Kamilah Muda and Yun-Huoy Choo, editors, Pattern Analysis, Intelligent Security and the Internet of Things, pages 117–130, Cham, 2015. Springer International Publishing. (Cité à la page 35.)

[Fernández-Heredia & Monzón 2010] Álvaro Fernández-Heredia and Andrés Monzón. *CYCLISTS' TRAVEL BEHAVIOUR, FROM THEORY TO REALITY.* travel behaviour, 2010. (Cité à la page 20.)

[Ferster *et al.* 2019] C. Ferster, J. Fischer, J. Manaugh, T. Nelson and M. Winters. *Using OpenStreetMap to inventory bicycle infrastructure : A comparison with open data from cities.* International Journal of Sustainable Transportation, 2019. (Cité à la page 42.)

[Floyd 1962] Robert W. Floyd. *Algorithm 97 : Shortest path.* Commun. ACM, vol. 5, no. 6, page 345, 1962. (Cité à la page 55.)

[Ford 1956] L. R. Ford. *Network Flow Theory.* Technical report, RAND Corporation, January 1956. (Cité à la page 55.)

[Gao *et al.* 2018] Jie Gao, Aimin Sha, Yue Huang, Liqun Hu, Zheng Tong and Wei Jiang. *Evaluating the cycling comfort on urban roads based on cyclists' perception of vibration.* Journal of Cleaner Production, vol. 192, pages 531–541, August 2018. (Cité à la page 21.)

[Geller 2006] Roger Geller. *Four types of cyclists.* Technical report, Portland Bureau of Transportation, 2006. (Cité aux pages 19 et 20.)

[Ghiasi *et al.* 2020] Amir Ghiasi, Omar Hussain, Zhen "Sean" Qian and Xiaopeng "Shaw" Li. *Lane Management with Variable Lane Width and Model Calibration for Connected Automated Vehicles.* Journal of Transportation Engineering, Part A : Systems, vol. 146, no. 3, page 04019075, March 2020. Publisher : American Society of Civil Engineers. (Cité à la page 30.)

[Ghojogh *et al.* 2020] Benyamin Ghojogh, Hadi Nekoei, Aydin Ghojogh, Fakhri Karray and Mark Crowley. *Sampling Algorithms, from Survey Sampling to Monte Carlo Methods : Tutorial and Literature Review.* Technical report arXiv :2011.00901, arXiv, November 2020. arXiv :2011.00901 [physics, stat] type : article. (Cité à la page 57.)

[Girres & Touya 2010] J-F. Girres and G. Touya. *Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset.* Transactions in GIS, vol. 14, pages 435–459, 2010. (Cité aux pages 4, 8, 26, 38, 41 et 148.)

[Goodchild 2007] Michael F. Goodchild. *Citizens as sensors : the world of volunteered geography | SpringerLink*, 2007. (Cité aux pages 4 et 24.)

[Grisiute *et al.* 2024] Ayda Grisiute, Pieter Herthogs, Nina Wiedemann and Martin Raubal. AN ONTOLOGY-BASED APPROACH FOR HARMONIZING METRICS IN BIKE NETWORK EVALUATIONS. Master's thesis, Institute of Cartography and Geoinformation, ETH Zurich, 2024. (Cité aux pages 23 et 24.)

[Gutierrez *et al.* 2007] Claudio Gutierrez, Carlos Hurtado and Alejandro Vaisman. *Introducing Time into RDF.* IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 19, no. 2, pages 207–218, February 2007. (Cité à la page 50.)

[Gutiérrez *et al.* 2020] Aaron Gutiérrez, Daniel Miravet and Antoni Domènech. *COVID-19 and urban public transport services : emerging challenges and research agenda.* Cities & Health, 2020. (Cité à la page 79.)

[Gössling & Choi 2015] Stefan Gössling and Andy S. Choi. *Transport transitions in Copenhagen : Comparing the cost of cars and bicycles.* Ecological Economics, vol. 113, pages 106–113, May 2015. (Cité à la page 1.)

[Hail *et al.* 2015] Mohamed Ahmed Hail, Marica Amadeo, Antonella Molinaro and Stefan Fischer. *Caching in Named Data Networking for the Wireless Internet of Things.* Dans International Conference on Recent Advances in Internet of Things, 2015. (Cité à la page 38.)

[Haklay 2010] Mordechai Haklay. *How Good is Volunteered Geographical Information ? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets.* Environment and Planning B : Planning and Design, vol. 37, no. 4, pages 682–703, August 2010. (Cité aux pages 38 et 42.)

[Hamme 2013] Janis Hamme. Multilevel dijkstra for shortest paths from external memory. Master's thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2013. (Cité à la page 55.)

[Hammersley & Handscomb 2013] J-M Hammersley and D-C Handscomb. Monte Carlo Methods | SpringerLink. Springer Dordrecht, 2013. (Cité à la page 58.)

[Hart *et al.* 1968] Peter Hart, Nils Nilsson and Bertram Raphael. *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths.* IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, vol. 4, no. 2, pages 100–107, 1968. (Cité à la page 55.)

[Herfort *et al.* 2023] Benjamin Herfort, Sven Lautenbach, João Porto de Albuquerque, Jennings Anderson and Alexander Zipf. *A spatio-temporal analysis investigating completeness and inequalities of global urban building data in OpenStreetMap.* Nature Communications, vol. 14, no. 1, page 3985, July 2023. (Cité à la page 42.)

[Hochmair *et al.* 2015] Hartwig H. Hochmair, Dennis Zielstra and Pascal Neis. *Assessing the Completeness of Bicycle Trail and Lane Features in OpenStreetMap for the United States.* Transactions in GIS, vol. 19, no. 1, pages 63–81, 2015. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tgis.12081. (Cité à la page 42.)

[Holzer *et al.* 2008] Martin Holzer, Frank Schulz and Dorothea Wagner. *Engineering Multi-Level Overlay Graphs for Shortest-Path Queries.* ACM Journal of Experimental Algorithmics, vol. 13, September 2008. (Cité à la page 56.)

[Hull & O'Holleran 2014] Angela Hull and Craig O'Holleran. *Bicycle infrastructure : can good design encourage cycling ?* Urban, Planning and Transport Research, vol. 2, no. 1, pages 369–406, January 2014. Publisher : Routledge _eprint : https ://doi.org/10.1080/21650020.2014.955210. (Cité à la page 22.)

[Hunt & Abraham 2007] J. D. Hunt and J. E. Abraham. *Influences on bicycle use.* Transportation, vol. 34, no. 4, pages 453–470, July 2007. (Cité à la page 79.)

[Hölzel *et al.* 2012] Christin Hölzel, Franz Höchtl and Veit Senner. *Cycling comfort on different road surfaces.* Procedia Engineering, vol. 34, pages 479–484, January 2012. (Cité à la page 21.)

[IGN 2021] IGN. *BD TOPO® Version 3.0 - Descriptif de contenu.* Technical report, Institut national de l'information géographique et forestière, 2021. (Cité aux pages 2, 24 et 71.)

[Indigo & Vertigo 2020] Indigo and Vertigo. *Impact économique et potentiel de développement des usages du vélo en France en 2020.* Technical report, ADEME, France, 2020. (Cité à la page 3.)

[ISO/IEC JTC 1/SC 7 2008] ISO/IEC JTC 1/SC 7. *ISO/IEC 25012 :2008*, 2008. (Cité aux pages 34, 35, 36 et 37.)

[ISO/IEC JTC 1/SC 7 2015] ISO/IEC JTC 1/SC 7. *ISO/IEC 25024 :2015*, 2015. (Cité à la page 34.)

[ISO/TC 211 2023] ISO/TC 211. *ISO 19157-1 :2023*, 2023. (Cité aux pages 36 et 37.)

[Jarke & Vassiliou 1999] Matthias Jarke and Yannis Vassiliou. *Data Warehouse Quality : A Review of the DWQ Project.* Dans 2nd Conference on Information Quality, 1999. (Cité à la page 35.)

[Johnson 1977] Donald B. Johnson. *Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks.* J. ACM, vol. 24, no. 1, pages 1–13, January 1977. (Cité à la page 55.)

[Joshi & James 2015] Avdhut Joshi and Michael R. James. *Generation of Accurate Lane-Level Maps from Coarse Prior Maps and Lidar.* IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 7, no. 1, pages 19–29, 2015. Conference Name : IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. (Cité à la page 30.)

[Juhasz 2021] Levente Juhasz. *Towards understanding the temporal accuracy of OpenStreetMap : A quantitative experiment.* Dans State of the Map, 2021. (Cité à la page 42.)

[Kapousizis *et al.* 2023] Georgios Kapousizis, Mehmet Baran Ulak, Karst Geurs and Paul J. M. Havinga. *A review of state-of-the-art bicycle technologies affecting cycling safety : level of smartness and technology readiness.* Transport Reviews, vol. 43, no. 3, pages 430–452, May 2023. Publisher : Routledge _eprint : https ://doi.org/10.1080/01441647.2022.2122625. (Cité à la page 21.)

[Kaul *et al.* 2011] Sanjit Kaul, Marco Gruteser, Vinuth Rai and John Kenney. *Minimizing Age of Information in Vehicular Networks.* Dans 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2011. (Cité à la page 38.)

[Kazienko *et al.* 2011] Przemysław Kazienko, Katarzyna Musial and Tomasz Kajdanowicz. *Multidimensional Social Network in the Social Recommender System.* Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on, vol. 41, pages 746–759, August 2011. (Cité à la page 51.)

[Kellstedt *et al.* 2021] D. Kellstedt, J. Spengler, M. Foster, C. Lee and J. Maddock. *A Scoping Review of Bikeability Assessment Methods.* Journal of Community Health, vol. 46, pages 211–224, 2021. (Cité à la page 22.)

[Kesenheimer *et al.* 2023] Jana S Kesenheimer, Christina Sagioglou, Andreas Kronbichler and Fiona R Kolbinger. *Why do people cycle (a lot) ? A multivariate approach on mental health, personality traits and motivation as determinants for cycling motivation.* Journal of Applied Sports Psychology, 2023. (Cité aux pages 19 et 20.)

[Kivelä *et al.* 2014] Mikko Kivelä, Alex Arenas, Marc Barthelemy, James P. Gleeson, Yamir Moreno and Mason A. Porter. *Multilayer networks.* Journal of Complex Networks, vol. 2, no. 3, pages 203–271, September 2014. (Cité aux pages 51 et 52.)

[Klinkhardt *et al.* 2023] Christian Klinkhardt, Fabian Kühnel, Michael Heilig, Sven Lautenbach, Tim Wörle, Peter Vortisch and Tobias Kuhnimhof. *Quality Assessment of OpenStreetMap's Points of Interest with Large-Scale Real Data.* Transportation Research Record, vol. 2677, no. 12, pages 661–674, December 2023. Publisher : SAGE Publications Inc. (Cité à la page 42.)

[Korver 2018] Aaron Korver. Behavioral cycling profiles and their potential as estimators for cycling motives. Master's thesis, Utrecht University, 2018. (Cité à la page 19.)

[Krisp & Keler 2015] Jukka M. Krisp and Andreas Keler. *Car navigation – computing routes that avoid complicated crossings.* International Journal of Geographical Information Science, vol. 29, no. 11, page 1988, 2015. (Cité à la page 21.)

[Le Guilcher *et al.* 2022] A. Le Guilcher, A.-M. Olteanu-Raimond and M. B. Balde. *ANALYSIS OF MASSIVE IMPORTS OF OPEN DATA IN OPENSTREETMAP DATABASE : A STUDY CASE FOR FRANCE.* ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. V-4-2022, pages 99–106, May 2022. Conference Name : XXIV ISPRS Congress "Imaging today, foreseeing tomorrow", Commission IV - 2022 edition, 6&ndash ;11 June 2022, Nice, France Publisher : Copernicus GmbH. (Cité aux pages 26, 39 et 170.)

[Li *et al.* 2025] Yan Li, Yuyang Zhang, Ying Long, Kavi Bhalla and Majid Ezzati. *Assessing bicycle safety risks using emerging mobile sensing data.* Travel Behaviour and Society, vol. 38, page 100906, January 2025. (Cité à la page 1.)

[Lu *et al.* 2018] Wei Lu, Darren M. Scott and Ron Dalumpines. *Understanding bike share cyclist route choice using GPS data : Comparing dominant routes and shortest paths.* Journal of Transport Geography, vol. 71, pages 172–181, July 2018. (Cité à la page 56.)

[Luxen & Vetter 2011] D. Luxen and C. Vetter. *Real-time routing with OpenStreetMap data.* ACM SIGSPATIAL 2011, pages 513–516, 2011. (Cité aux pages 55, 57 et 158.)

[MacKay 2003] David J C MacKay. Information Theory, Inference, and Learning Algorithms. Cambridge University press, 2003. (Cité à la page 58.)

[Madkour *et al.* 2017] Amgad Madkour, Walid G. Aref, Faizan Ur Rehman, Mohamed Abdur Rahman and Saleh Basalamah. *A Survey of Shortest-Path Algorithms.* Technical report arXiv :1705.02044, arXiv, May 2017. arXiv :1705.02044 [cs] type : article. (Cité à la page 53.)

[Madubedube *et al.* 2021] Aphiwe Madubedube, Serena Coetzee and Victoria Rautenbach. *A Contributor-Focused Intrinsic Quality Assessment of OpenStreetMap in Mozambique Using Unsupervised Machine Learning.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 10, no. 3, page 156, March 2021. Number : 3 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité aux pages 41 et 184.)

[Matias *et al.* 2020] Isabel Matias, Bertha Santos and Ana Virtudes. *Making Cycling Spaces in Hilly Cities.* KnE Engineering, pages 152–165, May 2020. (Cité à la page 22.)

[McGilvray 2008] Danette McGilvray. Executing Data Quality Projects : Ten Steps to Quality Data and Trusted InformationTM. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2008. (Cité à la page 36.)

[McQueen *et al.* 2020] Michael McQueen, John MacArthur and Christopher Cherry. *The E-Bike Potential : Estimating regional e-bike impacts on greenhouse gas emissions.* Transportation Research Part D : Transport and Environment, vol. 87, page 102482, October 2020. (Cité à la page 20.)

[Minaei 2020] Masoud Minaei. *Evolution, density and completeness of OpenStreetMap road networks in developing countries : The case of Iran.* Applied Geography, vol. 119, page 102246, June 2020. (Cité à la page 42.)

[Minghini & Frassinelli 2019] Marco Minghini and Francesco Frassinelli. *OpenStreetMap history for intrinsic quality assessment : Is OSM up-to-date ?* Open Geospatial Data, Software and Standards, vol. 4, no. 1, page 9, December 2019. (Cité à la page 42.)

[Minghini *et al.* 2018] M. Minghini, M. A. Brovelli and F. Frassinelli. *AN OPEN SOURCE APPROACH FOR THE INTRINSIC ASSESSMENT OF THE TEMPORAL ACCURACY, UP-TO-DATENESS AND LINEAGE OF OPENSTREETMAP.* The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XLII-4-W8, pages 147–154, July 2018. Conference Name : FOSS4G 2018 – Academic Track (Volume XLII-4/W8) - 29&ndash ;31 August 2018, Dar es Salaam, Tanzania Publisher : Copernicus GmbH. (Cité à la page 40.)

[Mooney & Corcoran 2014] Peter Mooney and Padraig Corcoran. *Analysis of Interaction and Co-editing Patterns amongst OpenStreetMap Contributors.* Transactions in GIS, vol. 18, no. 5, pages 633–659, 2014. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/tgis.12051. (Cité à la page 145.)

[Naumann *et al.* 2004] Felix Naumann, Johann-Christoph Freytag and Ulf Leser. *Completeness of Integrated Information Sources.* Information Systems, 2004. (Cité à la page 35.)

[Neis *et al.* 2011] Pascal Neis, Dennis Zielstra and Alexander Zipf. *The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps : OpenStreetMap in Germany 2007–2011.* Future Internet, vol. 4, no. 1, pages 1–21, December 2011. (Cité aux pages 42 et 43.)

[Novack *et al.* 2022] Tessio Novack, Leonard Vorbeck and Alexander Zipf. *An investigation of the temporality of OpenStreetMap data contribution activities.* Geo-spatial Information Science, pages 1–17, October 2022. (Cité aux pages 4, 43 et 144.)

[Néron *et al.* 2023] Emmanuel Néron, Tifenn Rault and Félix Repusseau. *Bicycle Network Improvements.* Dans ROADEF 2023 (24ème édition du congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision), Rennes, France, February 2023. (Cité à la page 18.)

[Oberoi *et al.* 2017] Kamaldeep Singh Oberoi, Géraldine del Mondo, Yohan Dupuis and Pascal Vasseur. *Spatial Modeling of Urban Road Traffic Using Graph Theory.* Dans Proceedings of

Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO) 2017, pages 264–277, Rouen, France, November 2017. INSA de rouen. (Cité à la page 50.)

[Oja *et al.* 2011] P. Oja, S. Titze, A. Bauman, B. de Geus, P. Krenn, B. Reger-Nash and T. Kohlberger. *Health benefits of cycling : a systematic review.* Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, vol. 21, no. 4, pages 496–509, 2011. _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1600-0838.2011.01299.x. (Cité à la page 1.)

[Ouyang *et al.* 2014] Wen Ouyang, Chang-Wu Yu, Kun-Ming Yu, Ko-Jui Lin and Huai-Tse Chang. *Safe Path Planning Strategy for Bike Net.* Wireless Personal Communications, vol. 78, no. 4, pages 1995–2007, October 2014. (Cité à la page 57.)

[Passmore *et al.* 2024] Reid Passmore, Kari Watkins and Randall Guensler. *Using shortest path routing to assess cycling networks.* Journal of Transport Geography, vol. 117, page 103864, May 2024. (Cité à la page 22.)

[Pathak 1962] Pramod Pathak. *On simple random sampling with replacement.* Sankhyā. Series A. Methods and Techniques, vol. 24, January 1962. (Cité à la page 58.)

[Peralta 2006] Veronika Peralta. *Data Quality Evaluation in Data Integration Systems.* phdthesis, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines ; Université de la République d'Uruguay, November 2006. (Cité à la page 36.)

[Poltimäe *et al.* 2022] Helen Poltimäe, Merlin Rehema, Janika Raun and Age Poom. *In search of sustainable and inclusive mobility solutions for rural areas.* European Transport Research Review, vol. 14, no. 1, page 13, April 2022. (Cité à la page 1.)

[Porta *et al.* 2006] Sergio Porta, Paolo Crucitti and Vito Latora. *The network analysis of urban streets : a primal approach.* Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science, 2006. (Cité aux pages 50 et 51.)

[Pucher & Buehler 2016] John Pucher and Ralph Buehler. *Safer Cycling Through Improved Infrastructure.* American Journal of Public Health, 2016. (Cité aux pages 1 et 21.)

[Pucher *et al.* 2010] John Pucher, Jennifer Dill and Susan Handy. *Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling : An international review.* Preventive Medicine, 2010. (Cité à la page 1.)

[Quetelard 2013] Bernard Quetelard. *Usagers et déplacements à vélo en milieu urbain.* Technical report, CEREMA, 2013. (Cité à la page 60.)

[Raifer *et al.* 2019] Martin Raifer, Rafael Troilo, Fabian Kowatsch, Michael Auer, Lukas Loos, Sabrina Marx, Katharina Przybill, Sascha Fendrich, Franz-Benjamin Mocnik and Alexander Zipf. *OSHDB : a framework for spatio-temporal analysis of OpenStreetMap history data.* Open Geospatial Data, Software and Standards, vol. 4, no. 1, page 3, December 2019. (Cité à la page 43.)

[RCVL 2019] RCVL. *Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires.* Technical report, Région Centre Val-de-Loire, 2019. (Cité à la page 4.)

[Rupi *et al.* 2019] Federico Rupi, Cristian Poliziani and Joerg Schweizer. *Data-driven Bicycle Network Analysis Based on Traditional Counting Methods and GPS Traces from Smartphone.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 8, no. 8, page 322, August 2019. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 44.)

[Rutten 2021] Janneke Rutten. How environmental characteristics contribute to a person's intention to go cycling in urban scenarios : looking at safety and attractiveness. Master's thesis, Eindhoven University of Technology, 2021. (Cité à la page 22.)

[Salvucci & Salvati 2022] Gianluigi Salvucci and Luca Salvati. *Official Statistics, Building Censuses, and OpenStreetMap Completeness in Italy.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 11, no. 1, page 29, January 2022. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 42.)

[Sauvanet 2011] G. Sauvanet. *Recherche de chemins multiobjectifs pour la conception et la réalisation d'une centrale de mobilité destinée aux cyclistes.* PhD thesis, Université François Rabelais - Tours, Tours, France, 2011. (Cité aux pages 18, 19, 29 et 56.)

[Schmidl *et al.* 2021] M. Schmidl, G. Navratil and I. Giannopoulos. *An Approach to Assess the Effect of Currentness of Spatial Data on Routing Quality.* AGILE : GIScience Series, vol. 2, pages 1–12, 2021. (Cité aux pages 39, 44, 47, 52, 57, 59, 63, 150, 156, 175 et 180.)

[Sehra *et al.* 2017] Sukhjit Singh Sehra, Jaiteg Singh and Hardeep Singh Rai. *Assessing OpenStreetMap Data Using Intrinsic Quality Indicators : An Extension to the QGIS Processing Toolbox.* Future Internet, vol. 9, no. 2, page 15, June 2017. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité aux pages 41, 42, 44, 59 et 148.)

[Serra *et al.* 2022] Flavia Serra, Veronika Peralta, Adriana Marotta and Patrick Marcel. *Use of Context in Data Quality Management : a Systematic Literature Review.* Technical report arXiv :2204.10655, arXiv, April 2022. arXiv :2204.10655 [cs] type : article. (Cité aux pages 34 et 35.)

[Setia *et al.* 2013] Pankaj Setia, Pankat Setia, Viswanath Venkatesh and Supreet Joglekar. *Leveraging Digital Technologies : How Information Quality Leads to Localized Capabilities and Customer Service Performance.* MIS Quarterly, vol. 37, no. 2, pages 565–590, 2013. Publisher : Management Information Systems Research Center, University of Minnesota. (Cité à la page 35.)

[Shao *et al.* 2022] Zezhi Shao, Zhao Zhang, Wei Wei, Fei Wang, Yongjun Xu, Xin Cao and Christian S. Jensen. *Decoupled Dynamic Spatial-Temporal Graph Neural Network for Traffic Forecasting.* Technical report arXiv :2206.09112, arXiv, September 2022. arXiv :2206.09112 [cs] type : article. (Cité à la page 50.)

[Shi *et al.* 2022] Jinlin Shi, Guannan Li, Liangchen Zhou and Guonian Lü. *Lane-Level Road Network Construction Based on Street-View Images.* IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 15, pages 4744–4754, 2022. Conference Name : IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. (Cité à la page 31.)

[Sidi *et al.* 2012] Fatimah Sidi, Payam Hassany Shariat Panahy, Lilly Suriani Affendey, Marzanah A. Jabar, Hamidah Ibrahim and Aida Mustapha. *Data quality : A survey of data quality dimensions.* Dans 2012 International Conference on Information Retrieval & Knowledge Management, pages 300–304, Kuala Lumpur, March 2012. IEEE. (Cité aux pages 34 et 35.)

[Temporelli *et al.* 2022] Andrea Temporelli, Paola Cristina Brambilla, Elisabetta Brivio and Pierpaolo Girardi. *Last Mile Logistics Life Cycle Assessment : A Comparative Analysis from Diesel Van to E-Cargo Bike.* Energies, vol. 15, no. 20, page 7817, January 2022. Number : 20 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 20.)

[Truong *et al.* 2020] Quy Thy Truong, Guillaume Touya and Cyril de Runz. *OSMWatchman : Learning How to Detect Vandalized Contributions in OSM Using a Random Forest Classifier.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 9, no. 9, 2020. (Cité à la page 27.)

[Truong 2020] Thérèse Quy Thy Truong. *Le vandalisme de l'information géographique volontaire : analyse exploratoire et proposition d'une méthodologie de détection automatique.* phdthesis, Université Paris-Est, January 2020. (Cité aux pages 52 et 145.)

[Uduwaragoda *et al.* 2013] E.R.I.A.C.M. Uduwaragoda, A.S. Perera and S.A.D. Dias. *Generating lane level road data from vehicle trajectories using Kernel Density Estimation.* Dans 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), pages 384–391, October 2013. ISSN : 2153-0017. (Cité à la page 31.)

[Vierø *et al.* 2024] Ane Rahbek Vierø, Anastassia Vybornova and Michael Szell. *BikeDNA : A tool for bicycle infrastructure data and network assessment.* Environment and Planning B : Urban Analytics and City Science, vol. 51, no. 2, pages 512–528, February 2024. Publisher : SAGE Publications Ltd STM. (Cité à la page 18.)

[Wang & Strong 1996] Richard Y. Wang and Diane M. Strong. *Beyond Accuracy : What Data Quality Means to Data Consumers.* Journal of Management Information Systems, vol. 12, no. 4, pages 5–33, 1996. (Cité aux pages 35 et 36.)

[Wang *et al.* 2020] Xiaoyang Wang, Yao Ma, Yiqi Wang, Wei Jin, Xin Wang, Jiliang Tang, Caiyan Jia and Jian Yu. *Traffic Flow Prediction via Spatial Temporal Graph Neural Network.* Dans Proceedings of The Web Conference 2020, WWW '20, pages 1082–1092, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. (Cité à la page 50.)

[Wang *et al.* 2024] Jingran Wang, Yi Liu, Peigong Li, Zhenxing Lin, Stavros Sindakis and Sakshi Aggarwal. *Overview of Data Quality : Examining the Dimensions, Antecedents, and Impacts of Data Quality.* Journal of the Knowledge Economy, vol. 15, no. 1, pages 1159–1178, March 2024. (Cité aux pages 34, 35 et 40.)

[Wałdykowski *et al.* 2022] Piotr Wałdykowski, Joanna Adamczyk and Maciej Dorotkiewicz. *Sustainable Urban Transport—Why a Fast Investment in a Complete Cycling Network Is Most Profitable for a City.* Sustainability, vol. 14, no. 1, page 119, January 2022. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 22.)

[Wu *et al.* 2014] Huanhuan Wu, James Cheng, Silu Huang, Yiping Ke, Yi Lu and Yanyan Xu. *Path Problems in Temporal Graphs.* Proceedings of the VLDB endowment, 2014. (Cité à la page 50.)

[Wysling & Purves 2022] Laura Wysling and Ross S. Purves. *Where to improve cycling infrastructure ? Assessing bicycle suitability and bikeability with open data in the city of Paris.* Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. 15, page 100648, September 2022. (Cité à la page 27.)

[Yager 1994] R Yager. *Aggregation operators and fuzzy systems modeling.* Fuzzy Sets and Systems, vol. 67, pages 129–145, 1994. (Cité à la page 182.)

[Yeboah *et al.* 2021] Godwin Yeboah, João Porto de Albuquerque, Rafael Troilo, Grant Tregonning, Shanaka Perera, Syed A. K. Shifat Ahmed, Motunrayo Ajisola, Ornob Alam, Navneet Aujla, Syed Iqbal Azam, Kehkashan Azeem, Pauline Bakibinga, Yen-Fu Chen, Nazratun Nayeem Choudhury, Peter J. Diggle, Olufunke Fayehun, Paramjit Gill, Frances Griffiths, Bronwyn Harris, Romaina Iqbal, Caroline Kabaria, Abdhalah Kasiira Ziraba, Afreen Zaman Khan, Peter Kibe, Lyagamula Kisia, Catherine Kyobutungi, Richard J. Lilford, Jason J. Madan, Nelson Mbaya, Blessing Mberu, Shukri F. Mohamed, Helen Muir, Ahsana Nazish, Anne Njeri, Oladoyin Odubanjo, Akinyinka Omigbodun, Mary E. Osuh, Eme Owoaje, Oyinlola Oyebode, Vangelis Pitidis, Omar Rahman, Narjis Rizvi, Jo Sartori, Simon Smith, Olalekan John Taiwo, Philipp Ulbrich, Olalekan A. Uthman, Samuel I. Watson, Ria Wilson and Rita Yusuf. *Analysis of OpenStreetMap Data Quality at Different Stages of a Participatory Mapping Process : Evidence from Slums in Africa and Asia.* ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 10, no. 4, page 265, April 2021. (Cité à la page 43.)

[Yu & Yang 1998] Gang Yu and Jian Yang. *On the Robust Shortest Path Problem.* Computers & Operations Research, vol. 25, no. 6, pages 457–468, June 1998. (Cité à la page 52.)

[Zakaria *et al.* 2023] Noor Jannah Zakaria, Mohd Ibrahim Shapiai, Rasli Abd Ghani, Mohd Najib Mohd Yassin, Mohd Zamri Ibrahim and Nurbaiti Wahid. *Lane detection in autonomous vehicles : A systematic review.* IEEE access, vol. 11, pages 3729–3765, 2023. (Cité aux pages 30 et 182.)

[Zhang & Malczewski 2018] Hongyu Zhang and Jacek Malczewski. *Accuracy Evaluation of the Canadian OpenStreetMap Road Networks.* International Journal of Geospatial and Environmental Research, 2018. (Cité à la page 41.)

[Zhao *et al.* 2015] Pengxiang Zhao, Tao Jia, Kun Qin, Jie Shan and Chenjing Jiao. *Statistical analysis on the evolution of OpenStreetMap road networks in Beijing.* Physica A : Statistical Mechanics and its Applications, vol. 420, pages 59–72, February 2015. (Cité aux pages 42 et 43.)

[Zheng *et al.* 2019] Ling Zheng, Huashan Song, Bijun Li and Hongjuan Zhang. *Generation of Lane-Level Road Networks Based on a Trajectory-Similarity-Join Pruning Strategy*. ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 8, no. 9, page 416, September 2019. Number : 9 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (Cité à la page 31.)

[Ziliaskopoulos & Mahmassani 1993] A. Ziliaskopoulos and H. Mahmassani. *Time dependent, shortest-path algorithm for real-time intelligent vehicle highway system applications*. Transportation Research Record, 1993. (Cité à la page 56.)

# Raphaël Bres

Modélisation et évolution du réseau cyclable

Le cyclisme est actuellement en plein essor car il est considéré comme une alternative écologique, économique et efficace à la voiture en zone urbaine. Nous nous intéressons à ses représentations dans les bases de données de réseaux de mobilités (BDRM). Ces dernières ne sont pas de bonne qualité car elles sont orientés vers d'autres usages principaux (voiture, piéton) et les infrastructures y sont représentées à l'échelle du tronçon de route. Notre étude postule que la représentation des BDRM à cette échelle ne permet de représenter que l'usage principal de ce-dernier en accordant peu d'importance aux usages secondaires (e.g. le vélo). Suite à ce constat, nous proposons une définition du réseau cyclable ainsi qu'une nouveau modèle de BDRM, à l'échelle de la voie, adapté au cyclisme et permettant la représentation de l'ensemble des usages de la route. Nous réalisons ensuite l'instanciation de cette BDRM avec la BDTOPO® puis OSM. Ces deux instanciations mettent en évidence des problèmes de qualité dans ces deux sources pour obtenir des données complètes et fraîches. Nous traitons cette question de la fraîcheur par le prisme de l'analyse de l'évolution du réseau, particulièrement dans OSM. Nous proposons pour cela deux méthodes complémentaires : une par tronçons de route qui est exhaustive sur une grande zone d'étude et une par itinéraires non-exhaustive sur de petites zones d'intérêt représentatives de notre zone d'étude. Nous cherchons aussi à rendre nos travaux facilement adaptables à tout usager du réseau routier. La zone d'étude pour l'ensemble de ces travaux de recherche est la région Centre-Val de Loire.

**Mots clés :** réseau cyclable, qualité des données, évolution des données, modélisation, information géographique volontaire

Cycling is currently booming, as it is seen as an ecological, economical and efficient alternative to the car in urban areas. We are interested in how it is represented in mobility network databases (MNDBs). These are not of good quality because they are oriented towards other main uses (car, pedestrian) and the infrastructures are represented at the scale of the road section. Our study postulates that the representation of BDRMs at this scale only allows the main use of the latter to be represented, with little importance being given to secondary uses (e.g. cycling). Following this observation, we propose a definition of the cycle network as well as a new BDRM model, at the lane scale, adapted to cycling and allowing the representation of all road uses. We then instantiate this BDRM with the BDTOPO® and OSM. These two instantiations highlight quality problems in these two sources in order to obtain complete and fresh data. We address this question of freshness through the prism of network evolution analysis, particularly in OSM. To do this, we propose two complementary methods : one based on road sections, which is exhaustive over a large study area, and one based on non-exhaustive routes over small areas of interest that are representative of our study area. We are also seeking to make our work easily adaptable to any road user. The study area for all this research work is the Centre-Val de Loire region.

**Keywords :** cycling network, data quality, data evolution, data modeling, volunteered geographical information