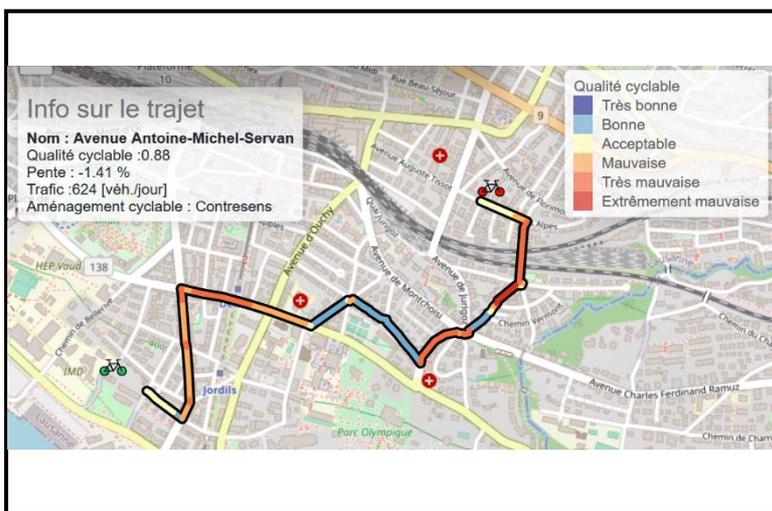


La qualité cyclable de la ville de Lausanne Evaluation et utilisation pour une application de routing

Romain Götz

Sous la direction du Dr. Christian Kaiser
Et sous l'expertise de Raphaël Bubloz



« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. À ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur-e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. »

Résumé

La mise en place d'un réseau cyclable continu, direct et sûr est essentiel pour encourager massivement l'utilisation du vélo et changer de paradigme de mobilité. Une diffusion des informations sur les opportunités existantes au sein du réseau actuel est également fondamentale. Face à ces enjeux, ce travail réalise d'abord une évaluation de la qualité du réseau cyclable de la ville de Lausanne en prenant en compte la qualité cyclable des rues et des intersections. Pour les premières, la présence d'aménagements cyclables en lien avec la charge de trafic et sa vitesse, la présence de poids lourds, la pente et la présence d'un environnement agréable sont intégrés. Quant aux intersections, une distinction est faite selon le type d'intersections et le mouvement tout en prenant en compte certaines configurations dangereuses et la présence d'infrastructures cyclables. Cette méthodologie permet de mettre en évidence les zones ainsi que les axes les plus problématiques au niveau de la sécurité et du confort pour les cyclistes. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision territoriale précieux pour l'administration lausannoise. La seconde partie de ce travail se base sur l'évaluation du réseau cyclable pour développer une application de routing mettant en avant les trajets les plus sûrs et confortables pour les vélos. L'objectif d'une telle application est de communiquer les opportunités existantes à de potentiel·le·s utilisateur·ice·s qui seraient intéressé·e·s à se déplacer à vélo, mais sont découragé·e·s à cause d'un niveau de sécurité et de confort lacunaires à leurs yeux. L'application permet d'intégrer les intersections afin de trouver le chemin le plus court au sein du réseau en maximisant la qualité cyclable. Pour ceci, l'algorithme de Dijkstra a été modifié pour développer un nouvel algorithme.

Mots-clés : réseau cyclable ; qualité cyclable ; routing ; algorithme du chemin le plus court ; intersections ; mobilité active ; distance perçue

Abstract

The existence of a continuous, direct and safe cycle network is essential to encourage cycling on a massive scale in order to change the mobility paradigm. Dissemination of information about the opportunities within the existing network is also fundamental. Faced with these challenges, this work first assesses the quality of the cycling network in the city of Lausanne by taking into account the cycling quality of streets and intersections separately. For the former, the presence of cycle facilities in relation to the traffic load and its speed, the presence of heavy vehicles, the shape and the presence of a pleasant environment are integrated. For intersections, a distinction is made according to the type of intersection and movement, while taking into account certain dangerous configurations and the presence of cycling facilities. This methodology makes it possible to highlight the most problematic areas and routes in terms of safety and comfort for cyclists. It is a valuable territorial decision-making tool for the Lausanne administration. The second part of this work is based on the evaluation of the cycling network to develop a routing application highlighting the safest and most comfortable routes for cyclists. The objective of such an application is to communicate the existing opportunities to potential users who are interested in cycling but are discouraged by the lack of safety and comfort. The application integrates intersections in order to find the shortest route through the network while maximising cycling quality. For this purpose, the Dijkstra algorithm was modified to develop a new algorithm.

Keywords : cycling network; cycling quality; routing; shortest path algorithm; intersections; active mobility; perceived distance

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais pris une forme finale sans le soutien moral de mes deux compères de mémoire : Julie et Léa. Elles m'ont accompagnés m'ont apporté une écoute et un réconfort essentiels durant ce travail solitaire. Les heures passées ensemble à étudier, à faire des pauses-café, à partager nos doutes, nos moments de stress ont été primordiales pour la réalisation de ce travail. Merci également à Manu et Ella-Mona pour les relectures.

Je tiens aussi à remercier les différentes personnes qui au cours de ces derniers mois m'ont permis de partager des moments pour déconnecter de ce travail.

Je tiens aussi à remercier mon directeur de mémoire Christian Kaiser pour ses cours autour de la cartographie et de la programmation qui ont développé chez moi un fort intérêt et m'ont poussé à réaliser ce travail. Je remercie également Raphaël Bubloz pour son travail d'expert.

Finalement, j'exprime ma gratitude et reconnaissance à la communauté de développeuses et développeurs sur le web qui prônent l'open source, passent du temps à faire des tutoriels, à répondre à des questions, et mettent à disposition leurs différents codes ou packages.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1	Pratique et potentiel d'utilisation du vélo : le canton de Vaud et la ville de Lausanne.....	3
1.2	Problématique	6
1.3	Plan	7
2.	Cadre conceptuel et théorique.....	8
2.1	Le système vélo	8
2.2	La qualité cyclable.....	10
2.2.1	Qualité cyclable et cyclabilité	10
2.2.2	Mesurer la qualité cyclable.....	10
2.2.3	Mesures objectives de la qualité cyclable	11
2.3	Caractéristiques importantes du potentiel d'accueil du territoire	13
2.3.1	Topographie.....	13
2.3.2	Trafic, vitesse et aménagements cyclables.....	13
2.3.3	Attractivité de l'environnement	14
2.3.4	Intersections	15
2.3.5	Autres facteurs	17
2.4	Théorie des graphes et réseau de transport.....	19
2.4.1	Théorie des graphes.....	19
2.4.2	Analyse du chemin le plus court	21
3.	Méthodologie	28
3.1	Délimitation du territoire : la ville de Lausanne	28
3.2	Jeux de données	30
3.2.1	Réseau cyclable OSM	31
3.2.2	Zones vertes et étendues d'eau.....	33
3.2.3	Charge de trafic.....	33
3.2.4	Aménagements cyclables des rues.....	33
3.3	Langages de programmation et logiciel.....	34
3.3.1	Langages de programmation	34
4.	Cadre opératoire	36
4.1	La qualité cyclable des rues	36
4.1.1	Coût de la topographie	37

4.1.2	Coût associé aux infrastructures cyclables	38
4.1.3	Bénéfice de l'attractivité de l'environnement	42
4.2	Qualité cyclable des intersections	43
4.2.1	Intersections avec signalisation lumineuse	43
4.2.2	Intersections sans signalisation lumineuse.....	45
4.2.3	Giratoires	46
4.3	Mise en forme des données	48
4.3.1	Réseau cyclable OSM.....	48
4.3.2	Topographie.....	49
4.3.3	Limite de vitesse du trafic.....	49
4.3.4	Zones vertes et étendues d'eau.....	49
4.3.5	Charge de trafic.....	50
4.3.6	Aménagements cyclables des rues	52
4.3.7	Aménagements cyclables des intersections	53
4.4	Application de routing et géovisualisation	55
5.	Résultats et discussion.....	57
5.1	Qualité cyclable des intersections	57
5.1.1	Intersections avec signalisation lumineuse	57
5.1.2	Intersection sans signalisation lumineuse	60
5.1.3	Petits giratoires.....	62
5.1.4	Grands giratoires	63
5.2	Qualité cyclable des liens.....	66
5.2.1	Topographie.....	66
5.2.2	Coût associé au trafic de poids lourds	68
5.2.3	Bénéfice zones vertes et étendues d'eau	70
5.2.4	Coût associé aux infrastructures cyclables, à la vitesse et au trafic	71
5.2.5	Qualité cyclable des liens.....	75
5.3	Application de routing	82
5.3.1	Présentation de l'interface côté utilisateur-trice	82
5.3.2	Présentation du fonctionnement côté serveur	85
5.3.3	Exemples de fonctionnement.....	86
5.3.4	Bilan et pistes d'amélioration et de réflexions	88

6. Conclusion 90

7. Références 93

Tables des illustrations

Tableaux

Tableau 1: Résumé des différents jeux de données, leur format, leur source et leur accès.....	30
Tableau 2: Résumé des attributs des nœuds du réseau OSM.....	31
Tableau 3: Résumé des attributs des liens du réseau OSM.....	32
Tableau 4: Récapitulatif des coûts pour les cyclistes selon les différentes infrastructures et limites de vitesse.....	41
Tableau 5: Coût multiplicateur additionnel dû aux aménagements cyclables possibles ou à certaines caractéristiques dangereuses.....	44
Tableau 6: Coûts pour les intersections sans signalisation lumineuse en fonction du mouvement du cycliste et du TJM (basé sur (Broach et al., 2012; Grigore et al., 2019; OFROU, 2021).....	45
Tableau 7: Coûts pour un giratoire à une voie d'entrée/de sortie et une vitesse à 30km/h ou 50 km/h en fonction du mouvement des cyclistes et du TJM.....	46
Tableau 8: Coûts pour les grands giratoires ayant un plus grand anneau de circulation en fonction de la vitesse et de la charge de trafic.....	47
Tableau 9: Longueur totale des différents aménagements cyclables pour le réseau cyclable de la ville de Lausanne.....	71

Figures

Figure 1: Vaud, 2000-2015 : Comparaison de la répartition modale des déplacements selon la distance (Statistique Vaud, 2017).....	3
Figure 2: 2010-2015: Evolution de la part modale du vélo (en %) dans les déplacements pour les plus grandes villes en Suisse (Rérat et al., 2019).....	4
Figure 3: Plan de parcours vélo au sein de la Ville de Lausanne intégrant la pente et le temps de trajet (Ville de Lausanne, 2016).....	5
Figure 4: Dimensions du système vélo (Rérat et al., 2019).....	8
Figure 5 : Etapes du tourner à gauche pour les cyclistes (OFROU, 2021).....	15
Figure 6: Exemple d'un multigraphe dirigé et valué (Réalisé sur l'application GraphOnline : https://graphonline.ru/fr/).....	20
Figure 7: Trois représentations différentes d'un même graphe dirigé et binaire. De gauche à droite : la représentation graphique, la matrice d'adjacence et liste d'adjacence (Beauguitte, 2010).....	20
Figure 8: Représentation du graphe d'exemple pour l'explication de l'algorithme de Dijkstra.....	22
Figure 9: Schéma de la recherche spatiale de trois algorithmes (de gauche à droite) : Dijkstra, Bi-Directionnel, A-star (Bast et al., 2015).....	26
Figure 10: Graphe d'exemple de la Figure 8 modifié en ajoutant un coût supplémentaire pour les nœuds E et F.....	27
Figure 11: Modification des intersections en étendant le graphe proposé Ehr Gott et al. (2012).....	27
Figure 12: Carte de situation de la ville de Lausanne avec les différents quartiers, quelques axes routiers importants.....	28

Figure 13: Visualisation du fonctionnement d'une page web avec les fichiers HTML, CSS et Javascript (https://developer.mozilla.org/fr/docs/Learn/Javascript/First_steps/What_is_Javascript#une_d%C3%A9finition_g%C3%A9n%C3%A9rale).....	35
Figure 14: Visualisation de la distance perçue le long d'un trajet (Grigore et al., 2019).....	36
Figure 15: Fonction du coût pour la topographie en fonction de la pente en [%].	37
Figure 16: Représentations des fonctions du coût des infrastructures cyclables selon le TJM et la vitesse pour 30 km/h et 40 km/h.	39
Figure 17: Représentations des fonctions du coût des infrastructures cyclables selon le TJM et la vitesse pour 50 km/h et 60 km/h.	39
Figure 18: Représentation de la fonction du coût des infrastructures cyclables selon le TJM pour 80 km/h.	40
Figure 19: Fonction du bénéfice de la présence de zones vertes et d'étendue d'eau en fonction du pourcentage d'espace recouvert.....	42
Figure 20: Schéma simplifié d'une intersection sous la forme d'un graphe.....	53
Figure 21: Premier schéma du design visuel de l'application.....	55
Figure 22: Schéma de visualisation de la structure de l'application web based.....	56
Figure 23: Histogramme de la qualité cyclable des intersections avec signalisation selon le mouvement à travers l'intersection.	57
Figure 24: Boxplots de la qualité cyclable des intersections avec feux de signalisation pour les trois mouvements droite, gauche et tout droit.	58
Figure 25: Barplot de la répartition des infrastructures cyclables aux intersections avec feux de signalisation.	59
Figure 26: Barplot de la répartition (et l'absence) des sas vélo aux carrefours avec feux de signalisation pour les 3 mouvements gauche, droite et tout droit.	60
Figure 27: Histogramme de la qualité cyclable des intersections sans feux de signalisation d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).	61
Figure 28: Histogramme de la qualité cyclable des petits giratoires d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).....	62
Figure 29: Histogramme de la qualité cyclable des grands giratoires d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).....	63
Figure 30: Boxplot de la qualité cyclable des grands giratoires pour les 3 mouvements à travers l'intersection (droite, gauche et tout droit).....	64
Figure 31: Boxplots de la qualité cyclable pour les 10 grands giratoires les plus problématiques.....	64
Figure 32: Carte du coût associé à la topographie pour la ville de Lausanne. Mise en classe personnalisée avec 1 classe pour les valeurs négatives qui reflètent un coût positif. Les 4 classes pour les valeurs positives suivent une mise en classe selon la méthode de Jenks. Les valeurs limites des classes ont été très légèrement arrondies pour avoir des valeurs plus simples (0.25 au lieu de 0.23 par exemple).....	67
Figure 33: Carte du coût associé au pourcentage de trafic poids lourds. Mise en classe par catégorisation absence-présence.....	68

Figure 34: Carte du bénéfice associé à un environnement accueillant par la présence de zones vertes ou d'étendues d'eau. Mise en classe selon Jenks avec mise à l'écart des valeurs nulles.	70
Figure 35: Carte pour les coûts associé aux infrastructures cyclables, à la vitesse et à la charge de trafic pour un sens de traversée.	72
Figure 36: Carte du coût associé aux infrastructures cyclables. Mise en évidence de trois zones : les quartiers du nord-est dans la zone rouge, les quartiers du sud-ouest dans la zone bleue et le quartier du centre-ville dans la zone verte.	73
Figure 37: Carte de la qualité cyclable pour la ville de Lausanne dans le sens de traversée u-v.	76
Figure 38: Carte de la qualité cyclable totale pour le sens de traversée inverse à la Figure 37.	77
Figure 39: Carte de la qualité cyclable pour trois zones d'intérêt pour la ville de Lausanne.	80
Figure 40: Page web d'accueil de l'application VéloRouter Lausanne.	82
Figure 41: Bouton de localisation.	82
Figure 42: Bouton pour inverser le point de départ et d'arrivée.	83
Figure 43: Toggle button activé pour la personnalisation des paramètres pour la qualité cyclable. ...	83
Figure 44: Bouton recommencer qui permet de remettre à zéro l'application.	83
Figure 45: Exemple d'un itinéraire affiché entre deux points définis par un clique sur la carte.	84
Figure 46: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le campus de l'Université et le point d'arrivée au Flon. Les paramètres de l'algorithme intègre la pente, mais pas les intersections.	86
Figure 47: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le campus de l'Université et le point d'arrivée au Flon. Les paramètres de l'algorithme intègrent la pente et les intersections.	86
Figure 48: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le Parc de Mon-Repos et le point d'arrivée au Chemin de Bérée. Les paramètres de l'algorithme n'intègrent pas les intersections.	87
Figure 49: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ un point au bord du lac au Port de Vidy et un point d'arrivée à la Gare de Lausanne. Les paramètres de l'algorithme n'intègrent pas les intersections.	87
Figure 50: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ un point au bord du lac au Port de Vidy et un point d'arrivée à la Gare de Lausanne. Les paramètres de l'algorithme intègrent aussi les intersections.	88

1. Introduction

La mobilité fait partie intégrante de notre quotidien en permettant le déplacement entre les différents lieux que nous fréquentons (Bierlaire et al., 2017). La volonté d'augmenter la vitesse de déplacement est un trait caractéristique des sociétés contemporaines et a entraîné une amélioration des technologies de déplacement et le développement de réseaux de transport (Bierlaire et al., 2017). Après la seconde Guerre mondiale, cette volonté a entraîné une augmentation rapide du trafic individuel motorisé (TIM) à cause de la perception de la voiture en tant qu'instrument de liberté et de modernité ; l'accroissement de la vitesse dans les déplacements a engendré de nouveaux territoires pour les entreprises et les ménages ayant comme externalité négative un étalement urbain progressif (Bierlaire et al., 2017; Héran, 2014). Pour faire face à l'augmentation du TIM et des problèmes de congestion, il a été nécessaire de développer un réseau de transport très hiérarchisé, constitué de voies de dessertes proches des lieux de travail et de loisirs, de grandes voiries et de grands espaces de stationnement (Héran, 2014). Tout ceci a nécessité une occupation de l'espace importante qui s'est obtenue notamment en confinant les autres modes de déplacement, la marche et le vélo, au strict nécessaire notamment dans les zones urbaines (Héran, 2014). Le développement du TIM s'est ainsi fait au détriment des autres modes de transport, et c'est le vélo qui a vu sa part modale se réduire le plus significativement (Héran, 2014).

L'essor du TIM a été possible, et est toujours possible, uniquement à travers l'abondance et le faible coût monétaire des énergies fossiles (Rérat et al., 2019). Or, nous nous trouvons dans un contexte d'une nécessité pressante d'une transition énergétique impliquant de modifier nos modes de vie et de diminuer drastiquement notre consommation d'énergie fossile afin de limiter les impacts du dérèglement climatique (IPCC, 2022). Dans cette transition, la question de la mobilité est éminemment politique et centrale ; une transition énergétique ne pourra se faire sans une mobilité à bas carbone (Rérat et al., 2019). En effet, la mobilité quotidienne actuelle, dominée par le TIM, comporte de nombreuses externalités négatives aux niveaux financier, environnemental et sanitaire (Bierlaire et al., 2017). Il y a tout d'abord l'existence d'une pollution locale avec l'émission de particules fines (PM_{10} et $PM_{2.5}$), d'oxydes nitreux (NO_x , NO_2) et de dioxyde de soufre (SO_2), des composants qui ont des impacts négatifs sur la santé en étant un risque aggravant de morbidité respiratoire, de mortalité cardio-pulmonaire, d'allergies et probablement du cancer du poumon (Banister & Woodcock, 2013). De plus, les déplacements motorisés se révèlent très passifs et immobiles pour l'utilisateur·trice entraînant un manque d'activité physique ; une part grandissante de la population européenne ne respecte pas la recommandation de l'OMS d'un minimum de 150 minutes d'activité physique modérée par semaine (Götschi et al., 2016; OMS, 2022). Ce manque d'activité physique constitue un risque aggravant d'obésité et de maladies chroniques (Banister & Woodcock, 2013). En outre, les coûts monétaires du réseau routier se révèlent très élevés et atteignent, en Suisse, une hauteur de 76 milliards de CHF en 2018 dont 77 % étaient imputables au transport des personnes (OFS, 2022). Finalement, il y a évidemment l'émission de CO_2 , principal gaz à effet de serre anthropique responsable du dérèglement climatique qui possède des effets irréversibles sur le long terme (Banister & Woodcock, 2013). En Suisse, pour l'année 2020, le secteur du transport (sans tenir compte de l'aviation) représentait 33 % de la consommation d'énergie et 39 % des émissions de CO_2 du pays (OFS, 2022).

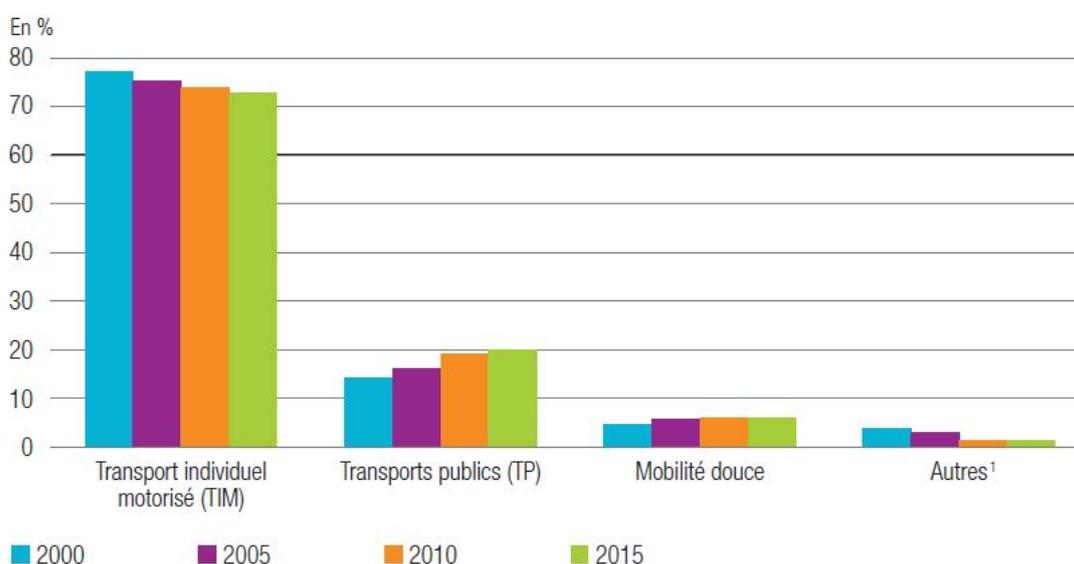
Face à la nécessité d'une mobilité à bas carbone, le rôle du vélo peut se révéler primordial puisqu'il comporte de nombreux avantages (Rérat et al., 2019). Tout d'abord, le vélo est caractérisé par une absence de pollution lors de son utilisation, que ce soit au niveau local ou global. Ensuite, l'utilisation du vélo est un apport essentiel pour la pratique d'une activité physique modérée de manière régulière et se révèle être très économe en termes d'espace et d'investissements nécessaires pour l'installation et la maintenance des infrastructures (Rérat et al., 2019). Finalement, de par sa rapidité et sa flexibilité, notamment par rapport à la marche, le vélo se révèle souvent être le mode de transport le plus efficace pour des trajets allant jusqu'à 5 km (et pouvant monter à 10-15 km pour les vélos à assistance électrique (VAE)) notamment dans les zones urbaines dans lesquelles la congestion du TIM est très importante (Rérat et al., 2019).

Face au potentiel d'utilisation du vélo et de ses nombreux avantages, de nombreuses administrations gouvernementales mettent en place des stratégies avec l'objectif d'augmenter de manière significative la part modale du vélo dans les déplacements (Héran, 2014). Ces stratégies passent souvent par le développement d'un réseau cyclable continu, sûr et confortable puisque le manque de sécurité et de confort sont la raison principale avancée concernant la non-pratique du vélo (Héran, 2014; Rérat et al., 2019). Cependant, développer uniquement un réseau cyclable n'est pas efficace, et il est nécessaire de mettre en place une stratégie complète et cohérente qui intègre différents services, règlements et lois, informations et formations pour encourager et faciliter la pratique du vélo (Héran, 2018). Parmi les différents leviers d'action, la communication et l'information jouent un rôle fondamental afin de favoriser l'utilisation du vélo. Parmi les canaux de communication possibles, la mise en place d'un système d'information sophistiqué, nommé *Intelligent Bicycle Routing*, est intéressante (Betz et al., 1993). Un tel système vise à mettre à disposition des informations précises sur les itinéraires cyclables, les aménagements et infrastructures, les opportunités ou encore les potentiels problèmes de sécurité, dans le réseau cyclable existant (Betz et al., 1993; Ehrgott et al., 2012). Lorsque ce concept a été élaboré dans les années 1990, les limites technologiques ne permettaient pas de mettre en place un tel système de manière réellement efficace. Depuis le début des années 2000, les avancées technologiques autour de l'informatique et la démocratisation d'Internet ont permis le développement et la diffusion de nombreuses solutions de création, d'analyse et de représentation de données spatiales (Ehrgott et al., 2012; Su et al., 2010). Il est désormais envisageable de développer un tel système d'information, notamment concernant la planification d'itinéraires spécialisés pour le vélo à un niveau personnel et de manière interactive à travers des applications de *routing* (Ehrgott et al., 2012). La mise en place de ces applications a été évoquée comme un élément important pour les cyclistes, occasionnel·le·s ou régulier·ère·s, et est une manière de favoriser les déplacements à vélos (Hochmair & Rinner, 2005; Su et al., 2010).

1.1 Pratique et potentiel d'utilisation du vélo : le canton de Vaud et la ville de Lausanne

Il est nécessaire de s'intéresser au potentiel d'utilisation du vélo pour la zone d'étude qui sera la ville de Lausanne. Cette dernière fait partie du canton de Vaud, ainsi, une majorité des données disponibles concernant la mobilité font parties d'enquêtes réalisées à l'échelle cantonale.

Pour le canton de Vaud, en comparaison avec les données de 2000 à 2015 (Figure 1), la répartition modale des déplacements a assez peu évolué sur les 15 dernières années avec uniquement une légère baisse du TIM compensée principalement par l'augmentation des TP et une très légère augmentation de la mobilité douce. Le TIM domine encore très largement les déplacements en couvrant près de 75 % la répartition modale.



¹ Principalement les taxis, autocars, camions et bateaux.

Figure 1: Vaud, 2000-2015 : Comparaison de la répartition modale des déplacements selon la distance (Statistique Vaud, 2017).

Au niveau de la distance journalière parcourue, elle était de 38 km en 2015, une distance qui n'a elle aussi pas évolué de manière significative depuis les années 2000 (Statistique Vaud, 2017). Pour les jours de la semaine (du lundi au vendredi), les déplacements utilitaires représentent près des trois-quarts (28 km sur 38) de cette distance avec comme motif principal le travail avec 12 km, suivi des loisirs à 11 km alors que les achats ferment la marche avec 5 km (Statistique Vaud, 2017). Les déplacements pour ces motifs sont encore largement dominés par le TIM ; il correspond à 77 % des déplacements pour le loisir, 76 % pour les achats et 67 % pour le travail (Statistique Vaud, 2017). La mobilité douce est toujours à la traîne avec 9 % pour les loisirs, 6 % pour les achats et seulement 4 % pour le travail. Il est important de noter que les modes de déplacement peuvent varier en fonction du caractère urbain ou rural du lieu de domicile. Pour la ville de Lausanne, plus grande ville du canton, la distance moyenne parcourue (tout motif confondu) est couverte à seulement 54 % par le TIM alors que la part pour les TP augmente de manière significative pour atteindre 37 % et que la mobilité douce augmente très légèrement pour atteindre 9 % (Statistique Vaud, 2017).

Concernant la part modale du vélo pour les grandes villes de Suisse, il existe de grandes disparités avec une tendance à des parts plus élevées pour les villes en Suisse-allemande par rapport aux villes suisses-romandes (Rérat et al., 2019). Pour la période 2010-2015, le trio de tête, composé de Bâle, Winterthur et Berne, possédait une part modale du vélo se situant entre 15 % et 17 % alors que Lausanne se situait en queue de peloton avec une part uniquement de 1,6 % (Figure 2). Une enquête a été réalisée en automne 2021 par l'association Pro Vélo Suisse auprès des cyclistes dans laquelle il était demandé de donner une note allant de 1 à 6 sur 6 différentes thématiques liées à la pratique du vélo. La ville de Lausanne obtient une note moyenne de 3.7 (sur un échantillon de 745 interrogé·e·s) avec aucune des 6 thématiques obtenant la moyenne ; la sécurité routière semble la plus problématique en obtenant un score de 3.3 alors que le climat général obtient 3.7, le confort 3.5 et le réseau cyclable 3.9 (Pannoza, 2022).

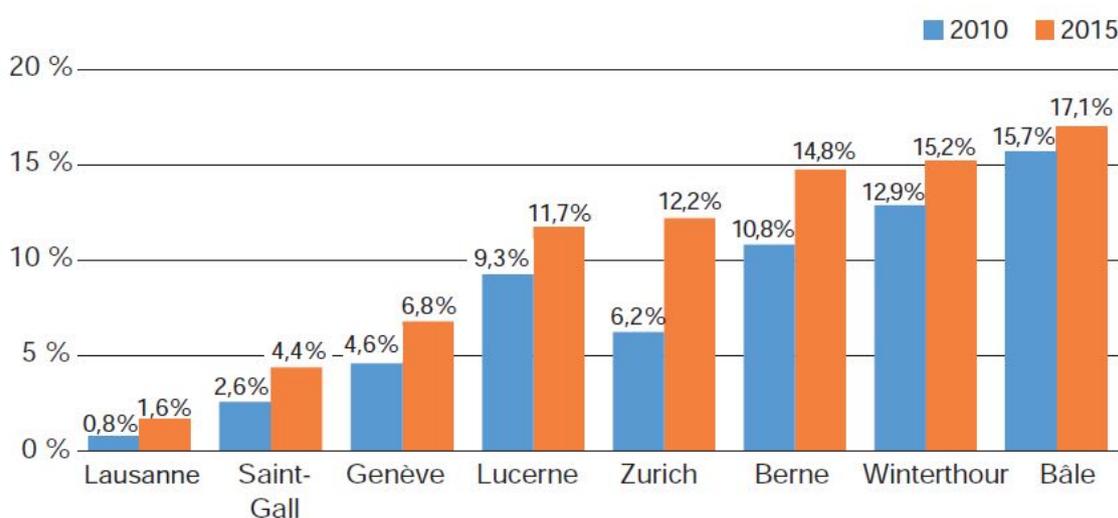


Figure 2: 2010-2015: Evolution de la part modale du vélo (en %) dans les déplacements pour les plus grandes villes en Suisse (Rérat et al., 2019).

Face à la domination encore très large du TIM pour la mobilité quotidienne et au fort potentiel d'utilisation du vélo, le canton de Vaud a mis en place une stratégie vélo pour l'horizon 2035 afin d'augmenter de manière significative la part modale du vélo dans les déplacements (DGMR, 2021b). Cette stratégie

propose que l'Etat joue un rôle plus volontariste et proactif en matière de développement des infrastructures cyclables et de promotion de la pratique du vélo. En augmentant massivement le nombre de parcours sécurisés, la qualité et les continuités des aménagements, l'Etat et ses partenaires (communes, régions, etc.) permettent à chacune et chacun, quel que soit son niveau à vélo, son âge ou son lieu de résidence, de pouvoir utiliser le vélo au quotidien et dans ses loisirs. Faire du vélo un réflexe – notamment par le biais de formations, actions de communications et d'incitation portées par une multitude d'acteurs – contribue à la diffusion de la nouvelle culture de la mobilité visée par le Canton de Vaud. (DGMR, 2021b, p.14)

À travers cette stratégie, on remarque la volonté de créer un réseau cyclable sûr et attractif pour le plus grand nombre de cyclistes, sans oublier de développer un système vélo complet en diffusant une nouvelle culture du vélo et en mettant en avant la promotion du vélo de différentes manières. Parmi les leviers d'action envisagés, la stratégie prévoit notamment de « faciliter la diffusion d'informations utiles aux usagers et usagères de l'espace public (par exemple infrastructures, itinéraires et services existants) (...) » (DGRM, 2021b, p.30) faisant écho au concept d'*Intelligent Bicycle Routing*. La stratégie cantonale met aussi en avant le rôle que peuvent jouer les communes, et le besoin d'une bonne gouvernance et coopération aux différents niveaux administratifs suisses. Dans cette stratégie, la ville de Lausanne occupe une place importante au vu de sa position de plus grande ville du canton ainsi que de son attractivité pour les emplois.

L'administration de la ville de Lausanne s'est d'ailleurs fixée comme objectifs dans son plan climat d'atteindre 15 % des déplacements effectués à vélo pour 2030 et de multiplier par 7 les kilomètres parcourus à vélo dans la vision d'atteindre zéro émission directe pour la mobilité d'ici à 2030 (SMAEP, 2021). Pour atteindre ces objectifs, la volonté affichée va dans le sens de la stratégie cantonale en attirant de nouveaux utilisateurs et de nouvelles utilisatrices à travers la mise en place d'un réseau cyclable sûr, continu, direct et confortable, notamment en améliorant la continuité des itinéraires existants. Ainsi, la ville tente d'améliorer et de compléter son réseau cyclable ; les aménagements cyclables ont atteint un total de 111.1 kilomètres en 2021, dont 10.5 km mis en place en 2020 dans les mois suivant le confinement suite à la pandémie mondiale de la Covid-19 (SMAEP, 2021). En dehors de l'amélioration du réseau cyclable, l'administration lausannoise met en avant la pratique du vélo à travers des campagnes de sensibilisation et de communication, la mise en place de stationnements vélos, ou encore des subventions pour l'achat de vélo électrique (SMAEP, 2022a).



Figure 3: Plan de parcours vélo au sein de la Ville de Lausanne intégrant la pente et le temps de trajet (Ville de Lausanne, 2016).

Au niveau de la communication, la ville de Lausanne met une partie des données sur les aménagements et infrastructures cyclables à disposition en ligne sur son guichet cartographique, mais ces données ne sont pas utilisées pour une analyse plus poussée. Il existe une seule carte mise à disposition par la ville de Lausanne quant à la pratique du vélo ; il s'agit d'une carte présentant certains parcours pour vélo à travers la ville de Lausanne (Figure 3). Cette carte donne quelques informations utiles, notamment sur la pente et le temps de parcours ainsi que sur certains grands axes pour traverser la ville. Néanmoins, étant statique et figée, elle ne reflète pas l'état actuel du réseau (la dernière mise à jour de la carte date de 2016), et les parcours proposés ne prennent en compte que la pente en laissant de côté la présence d'infrastructures cyclables. De plus, la planification de l'itinéraire à travers une carte aussi simplifiée demande un grand temps de préparation, car il faudrait explorer dans une autre application en ligne comme *OpenStreetMap* ou *Google Maps*, l'itinéraire précis au niveau des directions à prendre, notamment lors des intersections.

1.2 Problématique

Le but du présent travail est de répondre à deux enjeux majeurs. D'une part, la nécessité de développer un réseau cyclable sûr et d'autre part, le besoin de diffusion d'information du réseau existant auprès d'un maximum de potentiel·le·s utilisateur·trice·s. Pour ce faire, la problématique est séparée en deux axes principaux.

Le premier axe porte sur l'évaluation de la qualité du réseau cyclable de la ville de Lausanne. Un état des lieux du confort et de la sécurité du réseau actuel permet de cibler les zones ou les axes les plus problématiques nécessitant une amélioration rapide. En outre, la ville de Lausanne développe son réseau cyclable depuis quelques années, permettant ainsi l'observation des impacts des aménagements d'ores et déjà mis en place. De plus, une analyse au niveau de l'ensemble du territoire lausannois permet de mettre en exergue des potentiels problèmes de discontinuité du réseau. L'issue de cette partie sera la création d'une cartographie de la qualité cyclable de la ville de Lausanne. Cette cartographie pourra servir d'outil d'aide à la décision territoriale pour les administrations de la ville de Lausanne ou du Canton de Vaud, les décideur·euse·s politiques, ou encore des expert·e·s travaillant autour de la mobilité.

Pour ce premier axe, la problématique se formule comme suit :

- Comment la qualité cyclable peut-elle être définie et mesurée ?

Pour répondre à cette problématique, il est supposé que la qualité cyclable soit le résultat de différentes caractéristiques de l'environnement et du bâti qui peuvent être représentées à travers des données spatiales.

Le deuxième volet de ce travail se concentre sur la communication et l'accès à l'information du réseau cyclable existant. L'objectif est de développer une application de *routing* spécifique pour les trajets à vélo permettant de mettre en avant la sécurité et le confort. Cette seconde partie repose sur l'évaluation de la qualité cyclable du réseau réalisée dans la première partie. L'application développée se veut être un outil pour faciliter l'utilisation du vélo et améliorer l'expérience des utilisateur·trice·s. Les personnes visées par cet outil sont des potentiel·le·s utilisateur·trice·s du vélo dont le niveau de confort et les conditions de sécurité tout au long du trajet sont des facteurs déterminants dans leur choix de mobilité. Cependant, cette application ne se limite pas exclusivement à ce public, et pourrait

également permettre à des cyclistes régulier·ère·s de découvrir des trajets alternatifs et améliorer leur expérience.

La problématique pour ce second axe est la suivante :

- Comment développer une application *web based* de planification d'itinéraire spécifique au vélo permettant de mettre en avant la qualité cyclable auprès de potentiel·le·s utilisateur·trice·s du vélo ?

Pour cette application, plusieurs suppositions sont faites :

- Pendant leurs déplacements à vélo, les cyclistes ne prennent pas forcément le trajet le plus court et le plus rapide, mais ils et elles sont prêt·e·s à faire des détours pour améliorer les sentiments de sécurité et de confort.
- Le manque de diffusion des informations sur le réseau cyclable actuel, et notamment sur les opportunités de trajets les plus sécurisés et confortables possibles, sont un frein à une augmentation de la part modale du vélo dans les déplacements.

Les outils développés dans les deux axes de ce travail peuvent se révéler utiles aux administrations de la ville de Lausanne et du Canton de Vaud dans leur volonté d'augmenter la part modale du vélo dans les déplacements. En effet, le premier objectif de cartographie de la qualité cyclable se veut comme un support précieux d'aide à la décision territoriale pour la ville de Lausanne. Une telle cartographie permet de mettre en avant les endroits les plus problématiques du réseau cyclable actuel et offre l'opportunité d'avoir une vision d'ensemble de la qualité cyclable sur le territoire de la ville. Quant à l'application de *routing*, elle répond à la volonté cantonale de mise à disposition des informations pertinentes sur les infrastructures et aménagements mis en place pour améliorer les conditions d'utilisation du vélo.

1.3 Plan

Le présent travail se compose d'une première partie autour de notions et éléments important à définir pour situer de manière complète le contexte autour de ce travail. Ce premier chapitre s'intéresse à la dimension systémique de la pratique du vélo ainsi qu'à la définition de la qualité cyclable en présentant des mesures déjà développées pour son évaluation. Par la suite, les éléments majeurs quant au ressenti des cyclistes en terme de sécurité et de confort sont présentés. Cette partie se termine par une présentation d'éléments nécessaires pour le développement de l'application de *routing* ; la théorie des graphes et les algorithmes pour trouver le chemin le plus court à l'intérieur d'un graphe.

Les deux sections suivantes présentent la méthodologie et le cadre opératoire : la première introduit les outils utilisés alors que la seconde développe les différentes marches à suivre mises en place pour répondre aux deux problématiques de ce travail. La méthodologie délimite le territoire, décrit les données ainsi que les langages de programmation et les logiciels utilisés dans le cadre de ce travail. Quant au cadre opératoire, il développe les méthodes définies pour l'évaluation de la qualité cyclable des rues et des intersections de même que le cadre de développement de l'application de *routing*.

Les dernières parties de ce travail sont la présentation et la discussion des résultats suivi de la conclusion. Le premier volet permet d'analyser en profondeur les résultats obtenus pour la cartographie de la qualité cyclable et la construction de l'application de *routing* alors que la conclusion est l'opportunité de faire bilan du présent travail et d'explorer les perspectives de futures recherches.

2. Cadre conceptuel et théorique

2.1 Le système vélo

Pour analyser la pratique du vélo de manière systémique, certain·e·s auteur·rice·s ont avancé le concept de système vélo (Héran, 2018). Ce concept évoque le fait que la pratique du vélo dépend de différents facteurs et de différentes caractéristiques allant d'un réseau cyclable de sécurité homogène et continu aux différents services autour de l'utilisation du vélo (stationnements, atelier de réparation, location) tout en passant par une communication autour des avantages du vélo et des infrastructures en place (Héran, 2018). Rérat et al. (2019) ont proposé un cadre autour du système vélo en avançant que la pratique du vélo se situe au croisement de deux dimensions : une dimension individuelle appelée potentiel de mobilité de l'individu et une dimension territoriale appelée le potentiel d'accueil du territoire (PAT). Ces deux dimensions sont visibles dans la Figure 4.

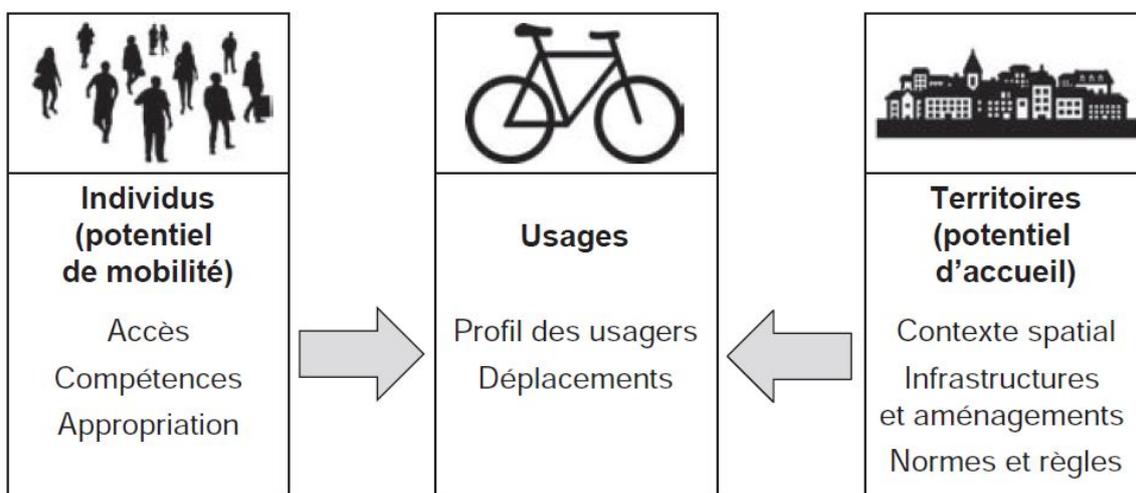


Figure 4: Dimensions du système vélo (Rérat et al., 2019).

Le potentiel de mobilité concerne les caractéristiques propres de chaque individu qui se concentrent autour de 3 axes principaux : l'accès, les compétences et l'appropriation (Rérat et al., 2019). L'accès exprime les options de mobilité dont chacun·e dispose, à savoir la possession d'un véhicule motorisé ou d'un vélo ainsi qu'un abonnement à un service de transport public. Les compétences expriment le savoir-faire du vélo qui peut se révéler plus difficile qu'il n'y paraît en fonction de la cohabitation avec le trafic motorisé et de la déclivité. Quant à l'appropriation, il s'agit de la perception et du choix du type de mobilité selon les habitudes, les besoins et les valeurs. Dans cette perspective, l'imaginaire des différents modes de transport est central ; il n'est pas suffisant qu'un moyen de transport soit à disposition, il faut qu'il soit utilisé et perçu (Rérat et al., 2019). Parmi les spécificités de cette dimension, le mouvement est important, il se réfère à la praticité et l'efficacité du déplacement et ses caractéristiques factuelles comme la distance, la durée, le motif ou encore la fréquence (Rérat et al., 2019). Le potentiel de mobilité varie donc énormément d'un individu à un autre et il peut se révéler plus difficile à modifier puisqu'il touche au comportement individuel. Néanmoins, il est possible d'influencer positivement le potentiel de mobilité de l'individu avec une bonne communication autour des avantages du vélo, de son utilisation, des infrastructures et services à disposition. La deuxième dimension du système vélo, le potentiel d'accueil du territoire (PAT), peut être considéré comme plus

objectif et plus facilement mesurable, car il est le même pour tous les individus et s'étend sur un territoire entier. Les possibilités de mobilité sont influencées par le champ des possibles offert par un territoire qui peut être plus ou moins accueillant (Kaufmann, 2014). Le PAT prend notamment en compte le contexte spatial, principalement le relief et le climat, mais aussi les normes et les règles établies autour de la pratique du vélo (Rérat et al., 2019). Un point central du PAT concerne les infrastructures et les aménagements en place, puisque la répartition de la mobilité selon les différents modes rend aussi compte de relations de pouvoir dans l'espace. La présence d'aménagements et d'infrastructures cyclables est ainsi nécessaire pour permettre un réseau cyclable dense, sécurisé et cohérent (Rérat et al., 2019). Ceci permet d'augmenter le nombre de déplacements à vélo, mais surtout de diversifier les potentiel·les utilisateur·ices du vélo (Rérat et al., 2019). Les deux dimensions du système vélo interagissent de manière dynamique et s'influencent ; le PAT influence par exemple l'appropriation, l'accès et les compétences du potentiel de mobilité de l'individu alors que les normes et les règles du potentiel d'accueil du territoire ont une grande influence sur l'appropriation et l'imaginaire autour de l'utilisation du vélo (Rérat et al., 2019).

Parmi les freins possibles à la pratique du vélo se trouve justement un PAT trop faible ; certain·e·s (possibles) usager·ère·s ne se sentent pas assez expérimenté·e·s et en sécurité pour prendre le vélo (Rérat et al., 2019). Geller (2006) propose un cadre intéressant concernant les habitant·e·s d'une ville et leur rapport à la pratique du vélo. Selon lui, il est possible de séparer les habitant·e·s en 4 catégories. Il y a tout d'abord les minoritaires *habiles et téméraires (1 %)* qui pratiquent la petite reine dans toutes les conditions suivis par les *motivé·e·s et confiant·e·s (6 %)* qui demandent la mise en place de certains aménagements et d'un certain niveau de sécurité et de confort pour pratiquer le vélo ou le faire de manière plus régulière. Ensuite, viennent les *pas question (33 %)*, c'est-à-dire les personnes qui n'utiliseront jamais le vélo même si les conditions sont bonnes ; soit par choix, soit par impossibilité physique. Finalement, la majorité des personnes sont *intéressé·e·s mais inquiet·e·s (60 %)*. Ces personnes seraient prêt·e·s à se déplacer à vélo, mais à condition que les infrastructures soient suffisamment développées pour assurer leur sécurité, c'est-à-dire qu'il existe un réel système vélo cohérent comportant un potentiel d'accueil du territoire élevé. Une étude effectuée au Royaume-Uni va dans la même direction que Geller. Il a été trouvé qu'une fraction de la population considère l'utilisation du vélo pour leurs déplacements, mais est limitée par des barrières hors de leur contrôle comme un manque d'infrastructures cyclables, des pentes trop raides, ou encore la météo. Ces barrières font écho au PAT (Gatersleben & Appleton, 2007). Bien entendu, la répartition des catégories peut varier en fonction de la ville et du contexte, et l'important n'est pas dans la précision des chiffres. L'idée derrière ce cadre est de démontrer le grand potentiel d'utilisation du vélo et que l'enjeu prioritaire de promotion du vélo doit passer par le fait de convaincre un maximum de personnes appartenant à la catégorie *intéressé·e·s mais inquiet·e·s* et que cela passe notamment par une amélioration du potentiel d'accueil du territoire et une meilleure communication autour des opportunités existantes (Ehrgott et al., 2012; Geller, 2006; Rérat et al., 2019).

Dans ce travail, c'est une fraction du potentiel d'accueil du territoire de la ville de Lausanne, à savoir le contexte spatial ainsi que les infrastructures et les aménagements, qui est explorée à travers l'évaluation de la qualité cyclable de la ville. De plus, le développement de l'application de routing

permet de mettre en avant les trajets les plus sûrs et confortables possibles pour espérer convaincre les personnes *intéressé·e·s mais inquiet·e·s*.

2.2 La qualité cyclable

2.2.1 Qualité cyclable et cyclabilité

Il est fondamental de définir la notion de qualité cyclable, notamment puisque dans la littérature, c'est le terme de cyclabilité qui est le plus souvent utilisé (Kellstedt et al., 2021). Le terme de cyclabilité ne possède pas de consensus pour sa définition et peut englober différentes dimensions du système-vélo. Kellstedt et al. (2021) proposent une définition générale faisant la synthèse de la plupart des définitions proposées : « *Bikeability may be defined as the extent to which the actual and perceived environment is conducive and safe for bicycling* » (Kellstedt et al., 2021, p. 212). Cette définition globale de la cyclabilité fait écho au système vélo en évoquant les différentes caractéristiques qui peuvent influencer la perception et la pratique du vélo. Lowry et al. (2012) puis Grigore et al. (2019) proposent de faire une distinction entre la cyclabilité et la qualité cyclable. La qualité cyclable concerne l'évaluation des routes et/ou des intersections en fonction de leur sécurité, de leur confort et de leur attractivité quant à la pratique du vélo (Lowry et al., 2012). La qualité cyclable se concentre donc sur le PAT à travers le contexte spatial et les infrastructures et aménagements existants. Quant à la cyclabilité, elle est plus générale et permet d'englober l'entier du système vélo, en intégrant ses autres dimensions. Il semble nécessaire de faire cette distinction, car une bonne qualité cyclable n'entraîne pas forcément une bonne cyclabilité. En effet, un réseau cyclable peut offrir des conditions de sécurité acceptables et une bonne qualité cyclable, mais si dans le même temps la pratique du vélo n'est pas encouragée et mise en avant, alors la cyclabilité n'est pas optimale, et l'augmentation des déplacements à vélo n'est que faible (Héran, 2018).

Dans ce travail, la qualité cyclable est donc une dimension du potentiel d'accueil du territoire et englobe en partie le contexte spatial ainsi que les caractéristiques de l'environnement, des infrastructures et des aménagements cyclables. C'est une dimension importante car une qualité cyclable trop basse peut décourager une potentielle utilisation du vélo tout en rendant la pratique du vélo stressante et désagréable pour les utilisateur·ice·s.

2.2.2 Mesurer la qualité cyclable

La qualité cyclable peut être évaluée de différentes manières qu'il est possible de regrouper en deux catégories : les mesures objectives et les mesures subjectives (Kellstedt et al., 2021). Dans les mesures subjectives, ce sont les ressentis, les besoins et/ou les retours d'expérience des (non-)utilisateur·ice·s du vélo qui sont récoltés en s'appuyant sur des interviews, des focus groupes ou des questionnaires (Kellstedt et al., 2021). Ces mesures s'intéressent à la fois au potentiel de mobilité de l'individu tout en cherchant à faire le lien entre l'usage du vélo et l'appréciation personnelle du PAT. Ces mesures permettent de mettre en avant les besoins et les envies des (non-)cyclistes pour les encourager à la pratique du vélo. Ces méthodes possèdent des limites méthodologiques, avec notamment le temps nécessaire pour obtenir suffisamment de réponses, la difficulté d'obtenir des profils variés dans les réponses (notamment des individus n'utilisant pas le vélo), ou encore de réaliser un diagnostic à une

large échelle (pour une ville par exemple) (Krenn et al., 2015). Les mesures objectives s'appuient sur les caractéristiques physiques de l'environnement et du bâti (considéré comme « objectives ») à travers l'utilisation de données spatiales et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour permettre une évaluation semi-automatique d'une partie du PAT (Kellstedt et al., 2021; Krenn et al., 2015). Même si elles sont dites objectives, il n'existe pas de consensus de méthodologie, car il existe une variété de contextes locaux et la possibilité de mettre l'accent sur certaines dimensions du potentiel d'accueil du territoire (Pritchard et al., 2019). Pour déterminer les données spatiales retenues pour une mesure objective, il est possible de s'appuyer sur des recommandations et lois, sur des résultats de mesures subjectives ou encore d'analyser les trajets de cyclistes (Broach et al., 2012; Grigore et al., 2019; Krenn et al., 2015; Winters et al., 2013). Parmi les limites méthodologiques, la disponibilité des données et leur qualité peut poser un problème même si de plus en plus de données spatiales sont accessibles gratuitement. De plus, il existe une partie manuelle, pour récolter les données et les rendre utilisables, qui peut se révéler assez grand suivant la taille du territoire à évaluer ainsi que selon la source et le format des données.

2.2.3 Mesures objectives de la qualité cyclable

Ce travail se concentre sur une évaluation objective de la qualité cyclable. Certaines méthodes intéressantes et souvent citées dans la littérature sont présentées ci-dessous. Ce sont aussi les mesures plus récentes qui ont été sélectionnées. À noter que certaines méthodes intègrent des dimensions supplémentaires à la qualité cyclable, mais ce sont les facteurs concernant la qualité cyclable qui sont mis en avant pour ce travail.

Le *Bicycle Level of Service (BLOS)* est parmi les évaluations de la qualité cyclable les plus anciennes développées et trouve son origine à la fin des années 1990 dans le *Real-Time Bicycle LOS* développé par Landis et al. (1997). La méthode a été mise à jour depuis et la dernière version du *BLOS* date de 2010 et est présentée dans la 6^{ème} édition du *Transportation Research Board's Highway Capacity Manual* (National Research Council, 2010). Cet indicateur se base sur 10 caractéristiques : les largeurs de la bande cyclable, de la voie de sortie et de la bande d'arrêt d'urgence, la proportion de stationnements occupés, le TJM, le pourcentage de poids lourds, la limite de vitesse, le nombre de voies, la qualité de la route ainsi que la présence d'un trottoir. Ces attributs sont intégrés dans une équation linéaire pour déterminer un score numérique catégorisé par la suite de A à F ; A représente la meilleure qualité cyclable et F la pire. Le *BLOS* permet de dresser un premier bilan concernant la qualité cyclable, mais il existe certaines limites. La plus importante réside dans la non-prise en compte de facteurs relevés comme essentiels concernant le confort et la sécurité des cyclistes ; la topographie et la distinction des aménagements cyclables. De plus, cette méthode a été développée aux USA, et le contexte local suisse peut se révéler très différent notamment au niveau de l'urbanisme (Grigore et al., 2019). Dans la continuité de ce travail, un *BLOS* pour les intersections, appelé *Intersection LOS*, a été développé et tient compte de 3 variables : la distance à traverser dans le carrefour, l'espace disponible pour les cyclistes et le volume de trafic (Landis et al., 2003). Cette méthode pour les intersections possède aussi des limites, notamment en ne prenant à nouveau pas en compte les infrastructures cyclables existantes.

Winters et al. (2012) ont proposé une nouvelle méthode pour évaluer la qualité cyclable de la région de Vancouver. Les facteurs retenus sont basés à la fois sur des focus groupes, mais également sur des analyses GPS de trajet de cyclistes. Cinq variables sont finalement retenues : la densité des infrastructures cyclables, la présence de pistes cyclables, la topographie, la connectivité des rues, et la densité de destination. Pour chacune des variables un coût allant de 1 à 10 est défini ; 1 représente une mauvaise qualité cyclable alors que 10 est une excellente qualité cyclable. Les coûts des différentes variables sont ensuite additionnés pour donner un score général appelé *bikeability*. Il s'agit de la première méthode qui propose une évaluation de la qualité cyclable applicable à l'échelle d'une ville ou d'une région en utilisant les SIG. La méthode possède quelques limites avec l'absence de distinction entre infrastructures cyclables (à l'exception des pistes cyclables) ainsi que la non-prise en compte du TJM et de la vitesse du trafic motorisé. De plus, les intersections ne sont pas intégrées dans cette méthode et elle est de nouveau réalisée dans un contexte nord-américain qui peut se révéler très différent du contexte suisse. Finalement, l'évaluation se fait à l'aide de grilles raster pour lesquels le problème de la taille du maillage se pose. Cette méthode donne une idée générale de secteurs avec une bonne qualité cyclable ou non, mais pas de détails fins au niveau des rues. Par conséquent, une zone peut obtenir une évaluation de la qualité cyclable moyenne alors qu'elle est en fait composée d'une rue avec une excellente qualité cyclable et d'autres rues avec une mauvaise qualité cyclable.

Par la suite, Krenn et al. (2015) ont repris cette méthode et l'ont adaptée au contexte européen. La plupart des variables retenues sont similaires, mais une nouvelle variable est ajoutée ; l'attractivité de l'environnement. La présence de zones vertes et d'étendues d'eau est intégrée comme un bénéfice, c'est-à-dire que cela améliore la qualité cyclable à travers une perception positive du territoire lors du trajet. Comme la méthode utilisée est très similaire à celle de Winters et al. (2012), les mêmes limites s'imposent.

Finalement, Grigore et al. (2019) propose une évaluation de la qualité cyclable très complète pour la ville de Bâle. Pour déterminer les facteurs à retenir, certaines études de mesures objectives et subjectives sont utilisées, de même que des recommandations pour les infrastructures cyclables aux niveaux fédéral et cantonal avec une comparaison avec les Pays-Bas et le Danemark (pays souvent cités comme paradis du vélo). Dans cette méthode, la qualité cyclable est évaluée pour les routes et les intersections de manière séparée en retenant différents facteurs. Pour les routes, les facteurs retenus sont répartis en quatre catégories : la déclivité, les différentes infrastructures cyclables en lien avec la vitesse et le TJM, l'attractivité de l'environnement (présence de zones aquatiques et vertes), et certaines caractéristiques relevées comme dangereuses avec la présence de stationnements et le pourcentage de poids lourds. Pour les intersections, le score obtenu dépend du TJM, de la limite de vitesse, de la présence d'infrastructures cyclables, de la direction du vélo et de certaines configurations dangereuses comme le nombre de voies ou la présence d'une voie pour tourner à droite pour le trafic motorisé. La manière d'attribuer le score de la qualité cyclable est intéressante et est faite à travers la notion de distance perçue. Les différents coûts sont additionnés pour obtenir un coût multiplicateur utilisé sur la longueur de base de la route pour donner la distance perçue. Ainsi, une route avec une mauvaise qualité cyclable aura une distance perçue plus longue que la distance réelle. Pour les intersections, un coût est aussi attribué et est directement une longueur qui représente le détour que seraient prêt·e·s à faire les cyclistes pour éviter cette intersection.

2.3 Caractéristiques importantes du potentiel d'accueil du territoire

Afin de pouvoir définir les facteurs retenus pour l'évaluation de la qualité cyclable (présentés dans les parties 4.1 et 4.2), il est nécessaire de présenter une partie des connaissances de la littérature ainsi que des recommandations fédérales et cantonales concernant les caractéristiques importantes du potentiel d'accueil du territoire pour la pratique du vélo dans des conditions sûres et confortables.

2.3.1 Topographie

La topographie joue un rôle primordial sur le ressenti de confort et d'attractivité des cyclistes, de même que sur leur sécurité, car les différences de vitesses avec le trafic motorisé peuvent être plus grandes (Héran, 2014). Une pente élevée positive demande un effort physique plus important tout en réduisant la vitesse ; ceci peut donner l'impression d'allonger la route tout en réduisant l'équilibre (OFROU, 2008). Ainsi, une pente raide positive est perçue négativement et certain·e·s cycliste·s sont prêt·e·s à faire un détour pour éviter cette configuration (Broach et al., 2012; Menghini et al., 2010; OFROU, 2008). Dans le même temps, une forte pente en descente peut aussi poser des risques au niveau de la sécurité avec une vitesse plus élevée qui peut entraîner une augmentation des risques d'accidents à cause d'un temps de perception des dangers plus faible, une distance de freinage plus longue et des accidents souvent plus graves (Grigore et al., 2019). La topographie est d'ailleurs une variable souvent retenue dans les différentes méthodes d'évaluation de la qualité cyclable présentée ci-dessus (Grigore et al., 2019; Krenn et al., 2015; Winters et al., 2013). Il est important de noter qu'avec l'émergence des vélos à assistance électrique, l'effet négatif de la pente élevée en montée peut jouer un rôle moindre, mais ceci n'a pas encore été quantifié et exploré dans la littérature.

2.3.2 Trafic, vitesse et aménagements cyclables

La cohabitation avec le trafic motorisé impacte négativement la perception de sécurité et de confort des cyclistes ; le volume de trafic et la vitesse des véhicules motorisés sont identifiés comme primordiaux par les cyclistes (Grigore et al., 2019; OFROU, 2008). Un trafic élevé a un impact négatif en baissant de manière significative le sentiment de sécurité des cyclistes tout en les exposant au bruit et à la pollution (OFROU, 2008; Stefánsdóttir, 2014). Le volume de trafic a été identifié comme le facteur le plus important, avec le temps de parcours, dans le choix de trajets de pendulaires (Sener et al., 2009). En revanche, une charge de trafic faible a été démontrée comme ayant un effet positif sur la pratique du vélo (Broach et al., 2012; Krenn et al., 2015; Winters et al., 2013). Selon les recommandations fédérales, le trafic possède un effet négatif sur la pratique du vélo à partir d'une charge de trafic dépassant 3'000 véhicules/jour et très négatif à partir de 10'000 véhicules (OFROU, 2008). De plus, la présence de poids lourds dans le trafic renforce l'impact négatif du trafic ; la charge de trafic de poids lourds ne devrait pas dépasser 8% (OFROU, 2008). La vitesse joue aussi un rôle fondamental, car une différence importante entre les cycles et les véhicules motorisés entraîne une baisse du sentiment de sécurité et peut augmenter le risque de conflit et d'accidents graves (Héran, 2014). Les zones de trafic modérées, comme les zones 30 et les zones de rencontre, possèdent ainsi un effet positif sur le sentiment de sécurité et de confort quant à la pratique du vélo en réduisant l'écart de vitesse avec les vélos (OFROU, 2008). Dès que la vitesse dépasse les 30 km/h, il est nécessaire

de mettre en place des aménagements pour les vélos (OFROU, 2008). Bien entendu, la charge de trafic et la vitesse interagissent et peuvent renforcer la perception négative des cyclistes (OFROU, 2008).

Pour contrer les effets négatifs du trafic et de la vitesse, il est nécessaire de mettre en place des aménagements cyclables appropriés pour améliorer la sécurité et le confort des cyclistes (OFROU, 2008). Il a été montré que les cyclistes préfèrent faire du vélo sur des aménagements cyclables plutôt que directement dans le trafic (Buehler & Dill, 2016). Il existe différents aménagements cyclables et ces derniers sont plus ou moins appréciés par les cyclistes. Les bandes cyclables ont un effet positif en augmentant le sentiment de sécurité, mais elles restent à proximité du trafic. Les pistes cyclables sont par conséquent préférées par les cyclistes comme elles permettent une séparation totale du trafic (Broach et al., 2012; Buehler & Dill, 2016; Krenn et al., 2015). Tilahun et al. (2007) mettent en avant que les pendulaires sont prêts à faire un détour pouvant aller jusqu'à 20 minutes pour passer d'une route sans aménagement à une route avec une piste cyclable. La mise en place de voies de bus autorisées aux cycles est aussi perçue positivement et il a été montré que cela réduisait le risque d'accident malgré la possibilité de conflit avec les bus (Adams & Aldred, 2020; Cazorla, 2017). En effet, les bus ont souvent des vitesses moins élevées que le TIM et la voie de bus permet d'être séparée plus clairement du trafic (Cazorla, 2017). Parmi les autres aménagements cyclables envisageables, il est possible d'ouvrir les zones piétonnes ou les trottoirs aux cycles ainsi que de mettre en place des zones de rencontre (DGMR, 2021a). Dans ces dernières, la vitesse est limitée à 20km/h, et la priorité est inversée ; les véhicules motorisés ne sont plus prioritaires, mais ce sont les piétons qui sont prioritaires (aussi par rapport aux vélos) (SMAEP, 2022b). Ces aménagements sont positifs, car ils permettent de séparer les cyclistes du trafic ou d'avoir un trafic très limité et à faible vitesse dans le cas des zones de rencontre. Néanmoins, la cohabitation avec les piétons peut poser certaines difficultés avec des risques de collision et la nécessité de réduire sa vitesse (Grigore et al., 2019).

2.3.3 Attractivité de l'environnement

L'attractivité de l'environnement le long d'un itinéraire possède un effet agréable et permet d'augmenter le confort et l'attractivité pour les cyclistes (OFROU, 2008; Stefánsdóttir, 2014). Krenn et al. (2015) intègrent notamment la présence de zones vertes et d'étendues d'eau comme un des cinq facteurs pour évaluer la qualité cyclable. De telles zones améliorent la perception de l'environnement, mais permettent également d'avoir des températures plus basses lors de fortes chaleurs en été (Grigore et al., 2019).

2.3.4 Intersections

L'évaluation de la qualité cyclable s'est souvent concentrée sur les routes en laissant de côté les intersections. Pourtant, les carrefours sont souvent des points faibles dans les itinéraires cyclables ; ils sont source de grand stress et sont perçus très négativement par les cyclistes tout en représentant une part élevée des lieux d'accidents impliquant des vélos en Suisse (Buehler & Dill, 2016; OFROU, 2021). Les carrefours sont une source de conflit potentiel entre les cyclistes et le trafic motorisé, car les flux de circulation se superposent et les aménagements cyclables ne sont pas possibles à l'intérieur des giratoires (OFROU, 2021). Ainsi, certaines études ont démontré que les cyclistes préféreraient éviter les intersections (avec ou sans signalisation) et les virages, car ils entraînent un sentiment d'insécurité, un possible délai et peuvent réduire le confort en ajoutant un départ arrêté (Broach et al., 2012; Menghini et al., 2010; Sener et al., 2009). Le sentiment de sécurité à travers les intersections est influencé par différentes caractéristiques détaillées ci-dessous.

2.3.4.1 Direction du mouvement

Le sentiment de sécurité et de confort lors de la traversée d'une intersection est grandement influencé par le sens de direction, à savoir si on doit tourner à gauche, à droite ou aller tout droit (OFROU, 2021). Le tourner à gauche est la manœuvre perçue comme la plus dangereuse, notamment pour les cyclistes peu expérimenté·e·s, car elle demande de traverser une ou plusieurs voies tout en réalisant rapidement différentes manœuvres dans un laps de temps très court, visibles dans la Figure 5 (Broach et al., 2012; Carter et al., 2007; OFROU, 2021). Le tourner à droite et le tout droit sont considérés comme moins dangereux, mais peuvent poser des problèmes si le carrefour ou les pré-sélections sont mal aménagés (OFROU, 2021). Parmi les configurations problématiques, il y a le fait de devoir effectuer une manœuvre pour traverser une voie afin de pouvoir continuer tout droit pour les cycles ou encore la présence d'une pré-sélection pour tourner à droite pour le trafic motorisé qui peut engendrer un conflit pour les cyclistes allant tout droit (Madsen & Lahrmann, 2017; OFROU, 2021). Ces problèmes sont amplifiés dès la présence de deux voies de circulation pour le trafic motorisé, car cela peut nécessiter de traverser ces voies avant de tourner et entraîne un sentiment général d'insécurité et d'inconfort pour les cyclistes (Carter et al., 2007; Landis et al., 2003).

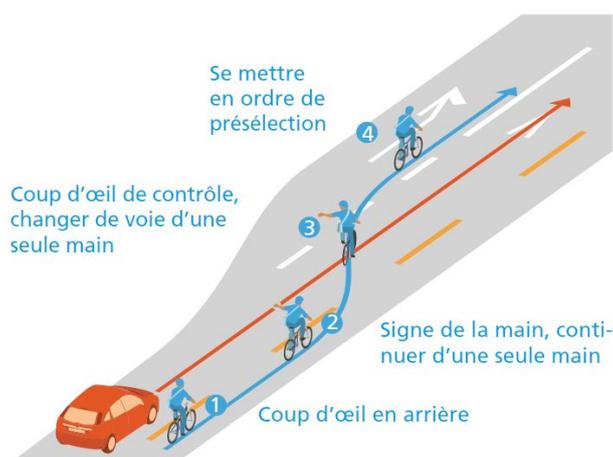


Figure 5 : Etapes du tourner à gauche pour les cyclistes (OFROU, 2021).

2.3.4.2 Trafic et vitesse

Comme pour les rues, le volume de trafic motorisé et la limite de vitesse jouent un rôle important dans la perception de sécurité et de confort des cyclistes aux intersections (OFROU, 2021). Dans leur étude, Broach et al. (2012) ont découvert que les cyclistes étaient prêt·e·s à faire des détours en fonction de la charge de trafic et de la direction prise. Pour un carrefour sans signalisation et un mouvement pour tourner à gauche, le détour (pour un trajet de 1,6 km) était de 150 mètres pour une charge de trafic entre 10'000 et 20'000 véhicules/jour et atteignait 370 mètres lorsque la charge dépassait 20'000 véhicules. Alors que dans le même temps, un mouvement pour tourner à droite n'entraînait qu'un détour de 60 mètres pour une charge de trafic dépassant 10'000 véhicules (Broach et al., 2012). Pour la limite de vitesse, elle influe sur le sentiment de sécurité avec des véhicules motorisés arrivant ou passant à côté des cyclistes plus ou moins vite pour les carrefours sans signalisation ainsi que les giratoires. Concernant les carrefours avec feux de signalisation, leur perception devient positive lorsque la charge de trafic est élevée, car cela permet d'augmenter la sécurité (Broach et al., 2012). Néanmoins, comme ces carrefours sont mis en place pour gérer une charge de trafic motorisé importante, et ce souvent sans considération pour les vélos, cela pose souvent des problèmes de sécurité et de confort (OFROU, 2021). D'ailleurs, le volume de trafic est un des trois facteurs intégrés dans l'évaluation des intersections définie par l'*Intersection LOS* (Landis et al., 2003). Au niveau des recommandations fédérales, une intersection avec une charge de trafic inférieure à 5'000 véhicules/jour et une vitesse de 20 à 30 km/h ne pose pas de problème de sécurité et ne nécessite pas de prendre des mesures. Néanmoins, à partir d'une charge de trafic supérieure à 5'000 véhicules/jour et des vitesses plus élevées, des mesures sont nécessaires pour garantir la sécurité des cyclistes (OFROU, 2021).

2.3.4.3 Infrastructures cyclables

Pour contrer les effets négatifs des carrefours et améliorer la sécurité et le confort des cyclistes, il est aussi possible de mettre en place différentes infrastructures cyclables (Buhler & Dill, 2016 ; OFROU, 2021). Pour les carrefours avec signalisation lumineuse, il est possible de mettre en place un sas vélo, un espace prévu pour les vélos en avant des pré-sélections pour le trafic motorisé. Cet espace permet d'améliorer la sécurité des cyclistes en augmentant leur visibilité par rapport au TIM et en permettant aux cyclistes d'être devant le trafic motorisé au démarrage puis dans le carrefour, et ainsi éviter certains conflits (Dill et al., 2012; Götschi et al., 2018; OFROU, 2021). De plus, le confort augmente aussi car les cyclistes ne sont pas directement exposés aux gaz d'échappement des véhicules motorisés (DGMR, 2021a; OFROU, 2021). Néanmoins, pour être totalement efficace, il faut que les sas vélo soient facilement accessibles, par exemple avec la présence d'une bande cyclable ou d'une voie de bus (OFROU, 2021). Il est aussi possible d'avoir uniquement une ligne d'arrêt avancée pour les vélos, la différence avec un sas vélo étant qu'il n'y a pas d'espace devant la pré-sélection du trafic motorisé (OFROU, 2021). Ensuite, comme le tourner à gauche est la manœuvre la plus dangereuse pour les cyclistes, la mise en place d'un tourner à gauche indirect peut être bénéfique (DGMR, 2021a; OFROU, 2021). Ce dernier permet d'effectuer la traversée du carrefour en deux temps sans devoir traverser des voies du trafic motorisé, ce qui améliore grandement la sécurité des cyclistes, surtout les moins expérimenté·e·s, mais demande plus de temps et des arrêts, et n'est pas possible à mettre en place à

tous les carrefours (Buehler & Dill, 2016; OFROU, 2021). Finalement, depuis quelques années en Suisse, il est possible de tourner à droite au feu rouge à certains carrefours pour les vélos (OFROU, 2021). Cet aménagement permet surtout d'améliorer la vitesse et le confort en évitant un arrêt et un temps d'attente aux cyclistes. Néanmoins, il peut aussi améliorer la sécurité tout en évitant de possibles conflits avec les véhicules motorisés à l'intérieur du carrefour comme une partie du flux de cyclistes sera déjà passée (OFROU, 2021).

Pour les carrefours sans signalisation lumineuse, dans le cas d'une charge de trafic ne dépassant pas 5'000 véhicules/jour et une vitesse limitée allant jusqu'à 30 km/h, il n'est pas nécessaire de mettre en place des mesures pour les cyclistes (OFROU, 2021). C'est à partir d'une charge plus importante, dépassant les 5'000 véhicules/jour, et des vitesses plus élevées (à partir de 50 km/h) que des mesures sont nécessaires pour assurer la sécurité et le confort des cyclistes lors du tourner à gauche et lors de la traversée du carrefour (OFROU, 2021). Parmi les aménagements possibles, il y a une pré-sélection pour les vélos au milieu de la route avec ou sans îlot de protection ou la démarcation en rouge des bandes cyclables aux endroits de conflits avec le trafic motorisé (OFROU, 2021).

2.3.4.4 Giratoires

Finalement, certains carrefours sont sous la forme de giratoires qui posent des problèmes de sécurité aux cyclistes et sont des lieux dans lesquels les accidents impliquant des vélos sont très fréquents (OFROU, 2021; Poudel & Singleton, 2021). Une étude effectuée au Danemark a démontré que la mise en place de giratoires à certaines intersections avait fait augmenter de 65 % le nombre d'accidents impliquant des vélos et de 40 % les blessures de cyclistes (Jensen, 2013). Parmi les caractéristiques dangereuses des giratoires, il y a la présence de plusieurs voies de circulation à l'entrée et à la sortie ainsi qu'un anneau de circulation large (avec plusieurs voies par exemple) car cela entraîne un trafic plus important et une vitesse plus élevée dans le giratoire tout en réduisant la visibilité des cyclistes pour les conducteur-ice-s (Akgün et al., 2018; OFROU, 2021). Au niveau fédéral, lorsque la charge de trafic dépasse les 15'000 véhicules/jour et que la vitesse est élevée (au-dessus de 30 km/h), il est recommandé de mettre en place des aménagements qui évitent la traversée du giratoire pour les cyclistes (OFROU, 2021). Pour qu'un giratoire soit relativement sécurisé pour les cycles, il faut une charge de trafic ne dépassant pas les 10'000 véhicules/jour, une seule voie d'entrée et de sortie, un anneau de circulation réduit à l'intérieur et une vitesse ne dépassant pas les 30 km/h (OFROU, 2021).

2.3.5 Autres facteurs

Un autre facteur révélé comme dangereux concerne la présence de stationnements le long des routes, car ils peuvent entraîner des conflits entre les vélos et les véhicules (Grigore et al., 2019; Sener et al., 2009). Les stationnements en parallèle sont perçus comme plus dangereux car la longueur de conflit possible est plus grande et que les cyclistes sont vulnérables à l'entrée ou à la sortie des automobilistes (Sener et al., 2009). Deux autres facteurs apparaissent aussi dans la littérature ; la présence d'éclairage le long des routes et la qualité de la route (Akar & Clifton, 2009; Lowry et al., 2012; OFROU, 2008). Néanmoins, ces facteurs ne sont pas intégrés dans l'évaluation de la qualité cyclable. Pour la présence d'éclairage et la qualité de la route, ces caractéristiques ont été moins étudiées et récolter de telle données pour la ville de Lausanne sort du cadre de ce travail. Les stationnements avaient

originellement été intégrés, mais au vu de leur impact moindre sur la qualité cyclable et du temps de préparation importants des données à disposition pour la ville de Lausanne, ce facteur a finalement été laissé de côté.

2.4 Théorie des graphes et réseau de transport

La modélisation et l'évaluation de réseaux de transports est un outil extrêmement utilisé pour l'évaluation de politiques publiques et pour déterminer les investissements dans ces réseaux (Liu et al., 2020). La modélisation se déroule en plusieurs étapes, et il est notamment nécessaire de déterminer les différents trajets possibles à travers le réseau (Rodrigue, 2020). Cette analyse des structures spatiales des réseaux de transport et des trajets possibles se fait à travers l'utilisation de la théorie des graphes (Beauguitte, 2010; Rodrigue, 2020). Néanmoins, encore aujourd'hui, la modélisation des transports se fait à travers le point de vue du trafic motorisé et n'intègre pas forcément le vélo (Ehrgott et al., 2012). De plus, même si ce dernier est intégré à la modélisation, les opportunités de trajets pour les cyclistes demandent de prendre en compte des caractéristiques très différentes du trafic motorisé (Liu et al., 2020). Les trajets empruntés par les cyclistes ne sont pas uniquement basé sur le temps, mais plutôt sur une combinaison entre ce dernier et les sentiments de confort et de sécurité (Ehrgott et al., 2012).

Cette partie présente certaines notions essentielles autour de la notion des graphes et de leur utilisation avant de se concentrer sur les algorithmes permettant de trouver le chemin le plus court à travers un réseau. Ces derniers ne sont souvent pas définis pour intégrer les spécificités liés au routing pour les vélos, il est donc nécessaire de les adapter.

2.4.1 Théorie des graphes

Un graphe est une représentation symbolique d'un réseau et de connections qui existent (Rodrigue, 2020). Un graphe G se définit mathématiquement comme un ensemble fini de nœuds v (*nodes* en anglais) et un ensemble fini, mais potentiellement vide, de liens e (*edges* en anglais) : $G = (v, e)$.

Les liens évoquent la relation entre deux nœuds ; pour un réseau de transport, il s'agira principalement d'une simplification d'une infrastructure de transport, souvent une route (Rodrigue, 2020). Dans le cas où la relation entre deux nœuds A et B est différente que celle entre B et A , le graphe est *dirigé* (*directed* en anglais), autrement le graphe est *non dirigé*. La nature des liens est aussi importante et il en existe trois types (Beauguitte, 2010) :

- Les graphes *binaires* : les liens expriment simplement la présence d'une relation entre deux nœuds.
- Les graphes *signés* dans lesquels les liens démontrent soit l'attrance, soit le rejet entre deux nœuds.
- Les graphes *valués* : les liens expriment la présence et l'intensité/le poids de la relation entre deux nœuds ; il s'agit en fait d'un graphe *binaire* qui ajoute une *intensité* (qui peut être représenté par différentes variables) à ce lien.

Finalement, un graphe peut être un *multigraphe* dans le cas où il pourrait y avoir des liens multiples entre deux mêmes nœuds, ce qui permet de tenir compte d'un poids différent entre $A-B$ et $B-A$. Cette notion est surtout importante pour l'analyse et la construction des réseaux. La Figure 6 démontre l'exemple d'un multigraphe valué et dirigé. En plus du poids, les nœuds et les liens peuvent contenir des attributs, c'est-à-dire des informations supplémentaires, comme la longueur du lien, le nom de la rue, les coordonnées, etc.

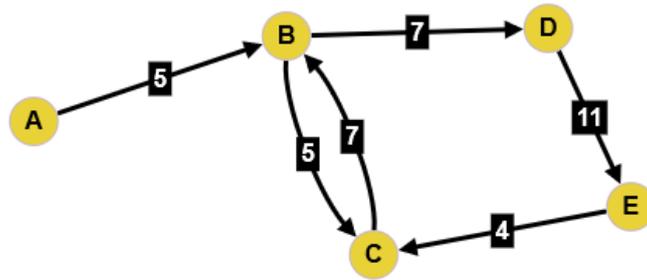


Figure 6: Exemple d'un multigraphe dirigé et valué (Réalisé sur l'application GraphOnline : <https://graphonline.ru/fr/>)

Un autre point important des graphes concerne les différentes représentations possibles. Parmi les plus répandues, il y a : la liste des liens, la matrice ainsi que la liste d'adjacence et la représentation graphique (Beauguitte, 2010). La *liste de liens* comporte tout simplement les liens du graphe dans un tableau et doit au minimum contenir deux informations, à savoir le nœud de départ et le nœud d'arrivée, mais de nombreux attributs pour chaque lien peuvent être ajoutés. La taille de la liste de liens est égale au nombre de liens du réseau, et peut se révéler très grande et peu économe en place suivant la taille du graphe. Néanmoins, il s'agit sûrement de la représentation avec laquelle il est le plus facile de travailler avec un graphe pour le modifier et avoir une bonne vision des attributs. La matrice d'adjacence, elle est une matrice $n \times n$ (n étant le nombre de nœuds). S'il existe une relation, entre deux nœuds, alors la valeur de la case correspondante est de 1 (ou la valeur de l'intensité dans le cas d'un graphe valué), 0 sinon. Comme la matrice d'adjacence peut être très grande, elle peut poser des problèmes de mémoire pour un grand graphe, et il n'est pas possible d'ajouter les attributs des liens directement dans la matrice. Pour compresser la taille de la matrice d'adjacence, il est possible d'utiliser la liste d'adjacence qui comporte les nœuds du graphe. Pour chaque nœud sont notés les nœuds voisins avec lesquels un lien existe. Il s'agit de la manière la plus économe en espace, mais elle rend la visualisation et la compréhension du graphe très difficile. Finalement, la représentation graphique est une représentation visuelle du graphe. Dans la Figure 7, trois visualisations différentes du même graphe sont visibles : la représentation graphique à gauche, la matrice d'adjacence au milieu et la liste d'adjacence à droite.

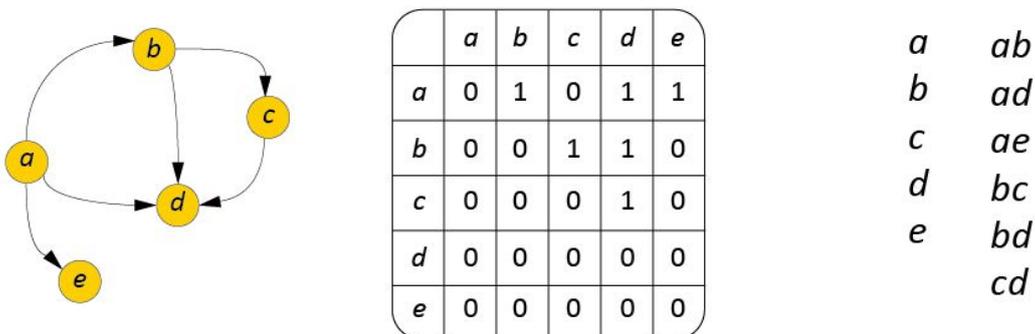


Figure 7: Trois représentations différentes d'un même graphe dirigé et binaire. De gauche à droite : la représentation graphique, la matrice d'adjacence et liste d'adjacence (Beauguitte, 2010).

Une autre caractéristique utile dans les graphes est la notion de degré. Chaque nœud possède un certain degré qui est le nombre de liens entrants/sortants du nœud. En prenant pour exemple la représentation à gauche de la Figure 7, le degré des nœuds A et D est de 3, alors que les nœuds B et C ont un degré de 2 et que E possède un degré 1.

Dans le cadre de ce travail, c'est un multigraphe dirigé et valué qui sera utilisé pour analyser le réseau cyclable. Ceci veut dire que la direction entre deux nœuds est importante puisque prendre une rue dans un sens ou dans l'autre peut être très différent dans un réseau cyclable. Ensuite, le poids de chaque lien pourra prendre différentes variables, comme la longueur du lien, sa qualité cyclable ou la distance perçue. Finalement, il s'agit d'un *multigraphe* afin de faciliter l'analyse du réseau puisque le poids entre deux nœuds A et B est différent pour la direction A-B et B-A.

2.4.2 Analyse du chemin le plus court

Dans l'analyse des réseaux de transports, on s'intéresse souvent aux différents chemins possibles dans le réseau, et notamment le chemin le plus court entre deux nœuds. Il est possible de minimiser (ou maximiser) différentes caractéristiques du réseau ; il s'agit la plupart du temps de minimiser le temps ou la distance. Néanmoins, il est aussi possible d'intégrer d'autres variables comme la qualité cyclable pour tenter de la maximiser le long d'un trajet.

2.4.2.1 Algorithme de Dijkstra

Pour déterminer le chemin le plus court à travers un graphe, différents algorithmes ont été développés, mais le plus utilisé et populaire encore aujourd'hui est celui proposé par Dijkstra (1959). Il est donc nécessaire de s'intéresser à cet algorithme pour mieux comprendre la manière dont le chemin le plus court peut être déterminé, et les complexités rencontrées pour le routing spécifique aux vélos.

Pour que l'algorithme de Dijkstra soit applicable, deux conditions sur le graphe sont nécessaires ; les liens doivent posséder un poids et ce poids ne peut être négatif.

Dans sa version la plus simple (entre deux nœuds), l'algorithme démarre en définissant un nœud de départ et un nœud de destination. Il est aussi possible d'uniquement déterminer le nœud de départ ; dans ce cas, l'analyse se fait entre ce nœud et tous les nœuds du graphe. L'algorithme fonctionne alors par itération en passant sur chacun des nœuds présent entre le nœud de départ et le nœud de destination. Chaque itération se déroule comme suit (Cassingena Navone, 2020; Javaid, 2013) :

- Déterminer le nœud sur lequel on passe.
 - L'algorithme fonctionne avec une liste de priorité pour les nœuds à visiter.
 - Pour la 1^{ère} itération : prendre au hasard un des nœuds adjacents au nœud de départ.
 - Autre itération : prendre le nœud avec le poids cumulé le plus bas, sauf s'il se trouve dans la liste des nœuds visités.
- Définir les nœuds adjacents.
- Déterminer le poids cumulé pour chacun de ces nœuds.
- Mettre à jour le poids cumulé s'il est plus petit que le poids enregistré jusque-là, et mettre à jour le chemin. Cette étape est nommée relaxation du lien (*edge relaxation*).
- Ajouter le nœud comme nœud visité.

- Recommencer une autre itération.
 - Si le nœud de destination est le nœud sur lequel on passe, l'algorithme se termine.

Pour bien comprendre, le fonctionnement de l'algorithme, un exemple, étape par étape, est expliqué pour le graphe représenté dans la Figure 8. Pour des questions de simplicité, le graphe est non dirigé.

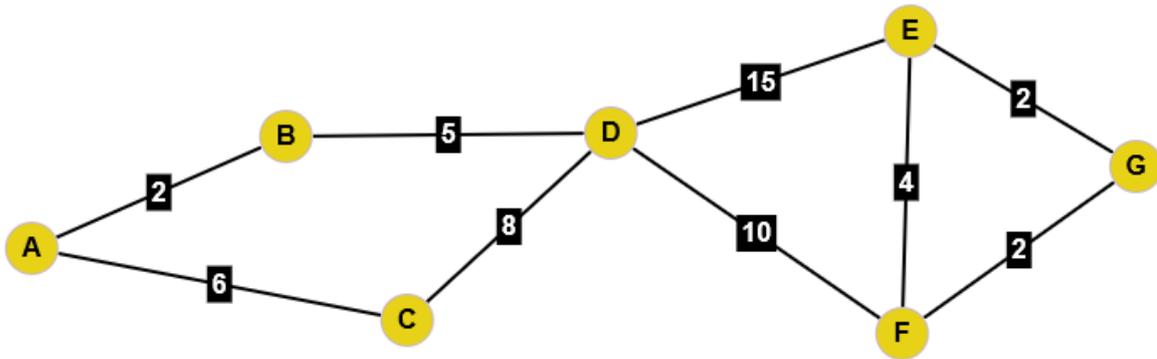


Figure 8: Représentation du graphe d'exemple pour l'explication de l'algorithme de Dijkstra.

L'algorithme nécessite de tenir une table contenant les différentes informations nécessaires pour trouver le chemin le plus court. Cette table contient :

- T : ensemble des nœuds du réseau, chacun sur une ligne différente.
- $D(v)$: poids cumulé du nœud de départ jusqu'au nœud v .
- $P(v)$: nœud prédécesseur de v .

Il est nécessaire aussi de tenir une liste des nœuds visités. Lorsqu'un nœud est visité, cela veut dire qu'il n'est plus possible de trouver un chemin plus court dans le réseau pour se rendre à ce nœud. L'algorithme fonctionne en déterminant de manière itérative afin de déterminer $D(v)$ et de s'assurer que ceci soit minimisé.

Pour notre exemple, on met en place cette table. Ici le nœud de départ, A, n'est pas ajouté dans la table. Il est aussi possible de l'intégrer et de définir son poids cumulé à 0. Pour tous les autres nœuds, on définit le poids cumulé comme infini. Passons maintenant aux différentes itérations.

1^{ère} itération

- Ici $T = \{A, B, C, D, E, F, G\}$
- Définir sur quel nœud on passe
 - Comme il s'agit de la 1^{ère} itération, on part du nœud de départ A
- Prendre les nœuds adjacents à A
 - B et C
- Déterminer le poids cumulé jusqu'à ces nœuds
 - A - B : 2
 - A - C : 6
- Mettre à jour ce poids dans le tableau si plus petit que le poids enregistré jusque-là
 - A - B : $2 < \text{infini}$, donc on met à jour valeur dans tableau
 - A - C : $6 < \text{infini}$, donc on met à jour valeur dans tableau

- Ajouter A comme nœud visité
 - Visité = { A }

Nœud	D(v)	P(v)
B	∞ 2	A
C	∞ 6	A
D	∞	
E	∞	
F	∞	
G	∞	

2^{ème} itération

- Définir sur quel nœud on se déplace
 - Prendre celui avec le poids le plus faible dans la table, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités (pas de retour en arrière)
 - B
- Prendre les nœuds adjacents
 - D
- Déterminer le poids jusqu'à ces nœuds
 - A - D : $2(A-B) + 5(B-D) = 7$
- Mettre à jour ce poids dans le tableau si plus petit que poids enregistrés jusque-là
 - A - D : $7 < \text{infini}$? Oui, donc on met à jour la valeur dans le tableau
- Ajouter B comme nœud visité
 - Visité = { A ; B }

Nœud	D(v)	P(v)
B	2	A
C	6	A
D	∞ 7	B
E	∞	
F	∞	
G	∞	

3^{ème} itération

- Définir sur quel nœud on se déplace
 - Prendre celui avec le poids le plus faible dans la table, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités (pas de retour en arrière)
 - C
- Prendre les nœuds adjacents
 - D
- Déterminer le poids jusqu'à ces nœuds
 - $A - D : 6 (A-C) + 8 (C-D) = 14$
- Mettre à jour ce poids dans le tableau si plus petit que poids enregistrés jusque-là
 - $A - D : 14 < 7$? Non, donc pas de mise à jour du tableau
- Ajouter C comme nœud visité
 - $\text{Visité} = \{ A ; B ; C \}$

4^{ème} itération

- Définir sur quel nœud on se déplace
 - Prendre celui avec le poids le plus faible dans la table, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités (pas de retour en arrière)
 - D
- Prendre les nœuds adjacents
 - E, F
- Déterminer le poids jusqu'à ces nœuds
 - $A - E : 2 (A-B) + 5 (B-D) + 15 (D-E) = 22$
 - $A - F : (A-B) + 5 (B-D) + 10 (D-F) = 17$
- Mettre à jour ce poids dans le tableau si plus petit que poids enregistrés jusque-là
 - $A - E : 22 < \text{infini}$? Oui, donc on met à jour la valeur dans le tableau
 - $A - F : 17 < \text{infini}$? Oui, donc on met à jour la valeur dans le tableau
- Ajouter D comme nœud visité
 - $\text{Visité} = \{ A ; B ; C ; D \}$

Nœud	D(v)	P(v)
B	2	A
C	6	A
D	7	B
E	∞ 22	D
F	∞ 17	D
G	∞	

5^{ème} itération

- Définir sur quel nœud on se déplace
 - Prendre celui avec le poids le plus faible dans la table, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités
 - F
- Prendre les nœuds adjacents, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités
 - E, G
- Déterminer le poids jusqu'à ces nœuds
 - A – E : $(A-B) + 5 (B-D) + 10 (D-F) + 4 (F-E) = 21$
 - A – G : $(A-B) + 5 (B-D) + 10 (D-F) + 2 (F-G) = 19$
- Mettre à jour ce poids dans le tableau si plus petit que poids enregistrés jusque-là
 - A – E : $21 < 22$? Oui, donc on met à jour la valeur dans le tableau
 - A – G : $19 < \infty$? Oui, donc on met à jour la valeur dans le tableau
- Ajouter F comme nœud visité
 - Visité = { A ; B ; C ; D ; F }

Nœud	D(v)	P(v)
B	2	A
C	6	A
D	7	B
E	22 21	D F
F	17	D
G	∞ 19	F

6^{ème} itération

- Définir sur quel nœud on se déplace
 - Prendre celui avec le poids le plus faible dans la table, sauf s'il est dans la liste des nœuds visités
 - G
- Comme G est le nœud de destination, l'algorithme s'arrête
- Le chemin le plus court pour se rendre de A à G est donc
 - $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow G$ avec un coût total de 19

Amélioration de l'algorithme de Dijkstra

L'algorithme de Dijkstra est l'algorithme de *routing* le plus connu, mais il n'est pas le plus rapide pour définir un trajet le plus court à travers un réseau. L'algorithme de Dijkstra est caractérisé comme gourmand (*greedy*), car il analyse tous les nœuds adjacents même si ces derniers se trouvent dans une direction opposée à la destination et représentent un retour en arrière ; une caractéristique contre-intuitive (Bast et al., 2015). Depuis son invention à la fin des années 1950, des algorithmes ont été développés pour améliorer cette caractéristique de l'algorithme de Dijkstra.

Certains algorithmes sont des modifications de l'algorithme de Dijkstra, comme l'algorithme A-star et le *bidirectional-search*. Ces derniers sont *goal-oriented*, c'est-à-dire qu'ils intègrent des fonctions pour limiter les nœuds visités en s'intéressant à ceux qui permettent de se rapprocher de la destination (Bast et al., 2015). La Figure 9 permet d'observer cette différence de comportement quant à la limite de la recherche spatiale pour les trois algorithmes.

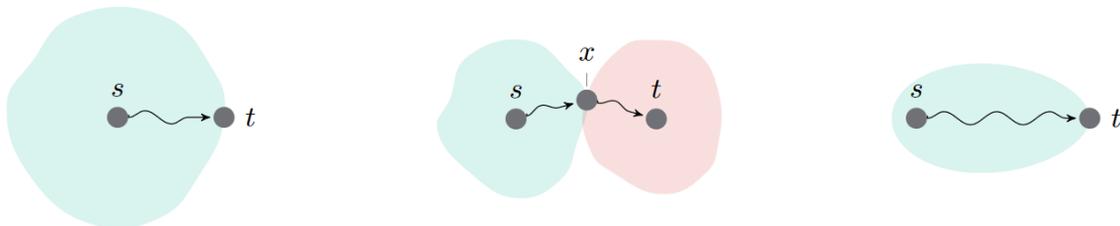


Figure 9: Schéma de la recherche spatiale de trois algorithmes (de gauche à droite) : Dijkstra, Bi-Directionnel, A-star (Bast et al., 2015).

De nombreux autres algorithmes ont été développés depuis, notamment avec l'amélioration des capacités de calcul informatique permettant d'effectuer des opérations plus complexes plus rapidement. Les différents algorithmes développés se concentrent sur l'amélioration de la rapidité de résolution du chemin le plus court ou sur la prise en compte de plusieurs variables pour la minimisation du poids le long du trajet (pour plus de détails voir l'état de l'art réalisé par Bast et al., 2015).

Dans le cadre de ce travail, c'est l'algorithme de Dijkstra qui est utilisé comme base de travail pour la détermination d'un trajet avec la qualité cyclable la plus grande. Le développement d'un algorithme de *routing* rapide et efficace sort du cadre de ce travail pour des questions de moyens et de temps.

2.4.2.2 Spécificités du routing pour vélos

Pour un réseau cyclable, il est possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra en définissant un poids autre que la distance ou le temps ; par exemple en fixant un poids lié à la qualité cyclable des liens. Néanmoins, une attention particulière doit être portée au fait que l'algorithme de Dijkstra minimise le poids du trajet à travers le réseau ; il est donc nécessaire de définir un poids qui, lorsqu'il se rapproche de 0, représente une très bonne qualité cyclable alors qu'une augmentation positive des valeurs reflète une qualité cyclable de plus en plus mauvaise.

Intégration des intersections

Une première spécificité pour les cycles concerne l'intégration de la qualité cyclable des intersections. Prenons à nouveau l'exemple du graphique de la Figure 8. On définit que les nœuds E et F sont des intersections, et on ajoute un poids supplémentaire dépendant de la traversée de l'intersection. Pour

passer de E à G en venant de D, le poids est de 1 alors que pour passer de F à G (toujours en venant de D), le poids est de 8.

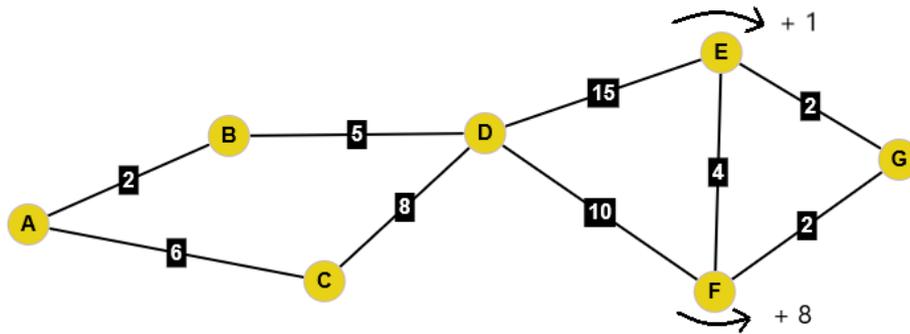


Figure 10: Graphe d'exemple de la Figure 8 modifié en ajoutant un coût supplémentaire pour les nœuds E et F.

Avec ces poids supplémentaires, le chemin le plus court n'est plus le même que pour l'exemple ci-dessus ; il s'agit dorénavant de $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow G$ qui possède un poids cumulé de 25. Dans sa forme originale, l'algorithme de Dijkstra ne permet pas d'intégrer un poids supplémentaire pour les intersections ce qui pose problème pour le routing pour cycles puisque les intersections sont des endroits de grand stress et qui peuvent poser de nombreux problèmes au niveau de la sécurité et du confort. Il est donc nécessaire de trouver une manière de contourner ce problème pour intégrer les intersections à l'algorithme de Dijkstra.

Une première possibilité est d'étendre le graphe (Ehrgott et al., 2012). Les nœuds du graphe qui sont des intersections sont modifiés avec l'ajout de nœuds et de liens supplémentaires pour représenter les différents mouvements possibles à travers l'intersection comme visible dans la Figure 11. Une deuxième possibilité est de modifier l'algorithme de Dijkstra afin de réussir à intégrer des coûts pour les intersections.

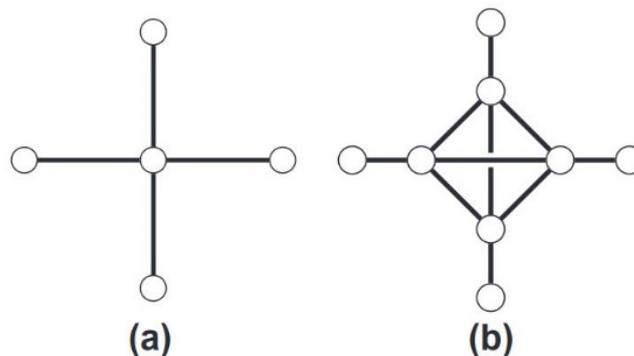


Figure 11: Modification des intersections en étendant le graphe proposé Ehrgott et al. (2012)

Equilibre entre le temps et la qualité cyclable

L'algorithme de Dijkstra permet de minimiser une seule variable à la fois. Ainsi, si le poids défini est la qualité cyclable, le temps du trajet n'entre pas en compte. Il s'agit d'une simplification de la réalité, car les cyclistes vont très certainement essayer de trouver un équilibre entre la qualité cyclable et le temps de parcours (Ehrgott et al., 2012). Dans leur travail de 2012, Ehrgott et al. ont défini un nouvel algorithme de routing qui permet justement de trouver un équilibre entre la qualité cyclable et le temps de parcours.

3. Méthodologie

Cette troisième partie présente la méthodologie du travail. Le territoire sur lequel porte le travail est délimité et quelques caractéristiques sont énoncées. Les jeux de données utilisés sont présentés avant de finir par l'évocation des différents langages de programmation et logiciels employés.

3.1 Délimitation du territoire : la ville de Lausanne

Ce travail s'intéresse à la ville de Lausanne. Elle est la quatrième ville de Suisse avec environ 140'000 habitant-e-s en 2019 (SECO, 2022). Il s'agit de la capitale du canton de Vaud, et elle possède une forte activité économique ; la ville représente 170'000 emplois dont environ 60'000 pendulaires et accueille 20'000 entreprises (SECO, 2018b). La superficie de la ville est de 18.9 km² pour la partie urbaine qui possède une très forte densité atteignant 7'759 habitant-e-s par m².

Répartition des quartiers de la ville de Lausanne, 2022

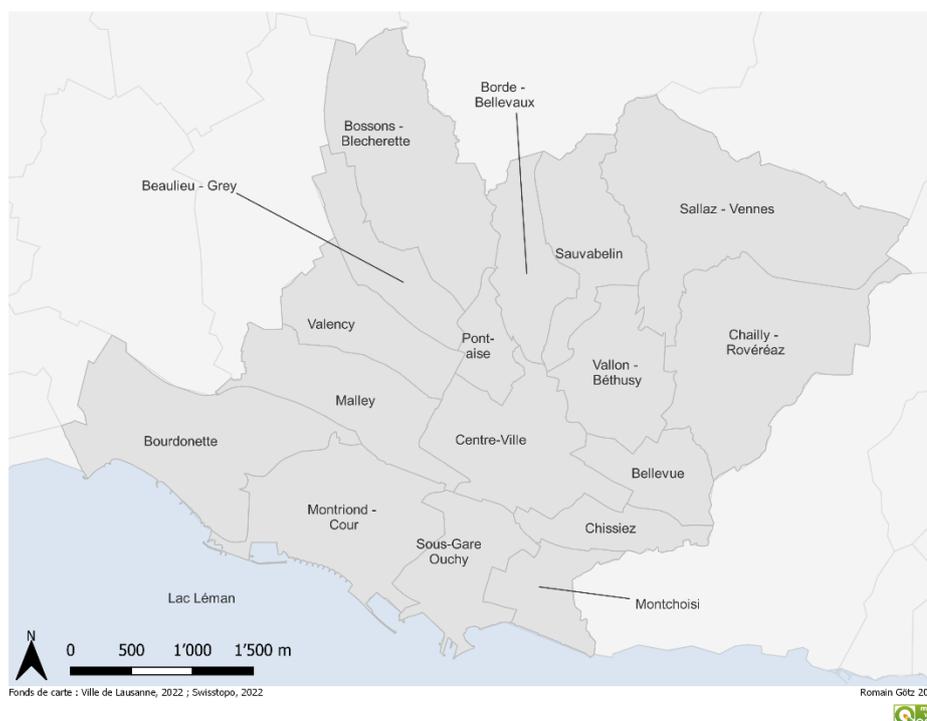


Figure 12: Carte de situation de la ville de Lausanne avec les différents quartiers, quelques axes routiers importants.

La ville de Lausanne est découpée en 18 quartiers dont 17 sont visibles dans la carte de la Figure 12. En effet, le quartier des zones foraines tout au nord de la ville (en dehors de la carte) n'a pas été intégré à ce travail ; il représente 56 % de la surface de la ville, mais uniquement 2 % du parc des logements et 3 % de la population (SECO, 2018). La délimitation selon les quartiers de la Figure 12 sert de référence spatiale pour faciliter l'analyse des résultats de la qualité cyclable (section 5.2).

Les quartiers de la ville de Lausanne possèdent des caractéristiques plus ou moins urbaines et résidentielles (SECO, 2018a). Les quartiers du Centre-Ville, de Valency, de Beaulieu – Grey, de Sous-Gare – Ouchy et de Borde-Bellevaux sont les plus densément peuplés et sont pourvus d'une densité de bâtiments élevée (SECO, 2018). Au contraire, les quartiers de Chailly-Rovéréaz et de Sauvabelin comptent une population et une densité du bâti bien plus basses : le premier est dominé par de

nombreuses maisons individuelles étalées alors que le second jouit de la large présence de la forêt de Sauvabelin (SECO, 2018). Le quartier de Malley, quant à lui, possède une population en augmentation et est marqué par la présence de nombreuses industries et de la zone industrielle de Sévelin (SECO, 2018).

Au niveau de la topographie, la ville de Lausanne témoigne de fortes déclivités avec une altitude à environ 370 m au bord du lac pour atteindre entre 650 et 700 m dans les quartiers de Sauvabelin et de Sallaz-Vennes. Ces déclivités sont principalement marquées pour l'axe nord-sud alors que l'axe est-ouest est plus aplani. Par conséquent, certains quartiers avec des routes sur l'axe nord-sud vont posséder des pentes importantes. C'est le cas pour le quartier Sous-Gare-Ouchy, du Centre-Ville et des quartiers au nord du territoire.

3.2 Jeux de données

Dans le cadre de ce travail, différentes données spatiales ont été nécessaires pour appliquer la méthodologie proposée pour la qualité cyclable (présentée dans la partie 4). Les différents jeux de données sont présentés dans le Tableau 1 en précisant la source, les données représentés ainsi que le format et si les données sont open source.

Tableau 1: Résumé des différents jeux de données, leur format, leur source et leur accès.

Source	Données	Format	Accès
<i>Open Street Map</i>	Réseau cyclable	Shapefile (Lignes et points)	Open Source
	Zones aquatiques et vertes (parcs)	Shapefile (Polygones)	Open Source
<i>Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)</i>	Charge de trafic du modèle national de trafic voyageur (MNTP) 2017	Shapefile (Lignes)	Open Source
<i>Office fédérale de la topographie - Swisstopo</i>	SWISSALTI3D - modèle numérique de terrain (MNT)	Raster	Open Source
<i>Service de la mobilité et de l'aménagement des espaces publics (ville de Lausanne)</i>	Aménagements cyclables des rues	Shapefile (Lignes)	Open Source - Guichet cartographique de la ville de Lausanne
	Aménagement cyclable des intersections	Shapefile (Points)	En partie Open Source - Guichet cartographique de la ville de Lausanne Sur demande à la ville de Lausanne pour certains aménagements
	Zones de vitesse modérée	Shapefile (Polygones)	Open Source - Guichet cartographique de la ville de Lausanne

3.2.1 Réseau cyclable OSM

Le réseau cyclable OpenStreetMap (OSM) est utilisé comme base de travail. OSM est une base de géodonnées mondiale *opensource* très riche, mais également un outil de cartographie collaborative en ligne. Une communauté de cartographes, professionnel-le-s ou passionné-e-s, contribue à l'entretien de la base de données en mettant à jour ou en ajoutant des données en se basant sur l'imagerie aérienne, des récepteurs GPS ou une connaissance locale du terrain (OSM, 2023). Cette dimension collaborative est une grande force d'OSM puisqu'elle permet de construire une base de données complexe et très détaillée sur le monde entier (Ehrig-Page, 2020). Cependant, cette dimension possède certains points faibles. La qualité des données peut être fluctuantes ; certaines zones vont posséder un niveau de détails plus fin que d'autres, tout simplement car plus de contributeur-trice-s auront mis à jour les données pour certaines zones (Ehrig-Page, 2020). De plus, il n'existe pas de standards ou de méthodes communes concernant la mise à jour des données ; ces dernières peuvent être erronées. Dans ce travail, OSM est utilisé pour obtenir le réseau cyclable, mais les données sont complétées ou mises à jour selon des jeux de données de sources différentes pour les caractéristiques importantes quant à la qualité cyclable comme le trafic, la vitesse, ou encore les aménagements cyclables.

Le réseau cyclable a été téléchargé pour la région de Lausanne à travers le package python OSMnx qui permet d'aller récupérer le réseau cyclable en ligne (Boeing, 2017). C'est sur ce réseau existant, datant de septembre 2022, que les données nécessaires pour l'évaluation de la qualité cyclable et l'algorithme de routing ont été ajoutés, il est donc présenté en détails.

Le réseau cyclable OSM téléchargé est sous la forme d'un *multigraphe dirigé*. Dans ce graphe, les liens représentent des segments de routes du réseau de transport entre deux nœuds. Les nœuds du réseau OSM ne sont pas forcément des intersections, puisqu'une grande partie des nœuds sont *interstitiels*. Les nœuds vont suivre la courbure des routes, ce qui permet de garder la forme réelle du réseau de transport, mais entraîne un réseau comportant énormément de nœuds et de liens. Ainsi, le réseau cyclable téléchargé pour la zone d'étude possède originellement 45'399 liens and 23'423 nœuds. Les nœuds et les liens du réseau OSM possèdent différents attributs utilisés dans la suite du travail dont les plus importants sont présentés ci-dessous dans le Tableau 2 et le Tableau 3.

Attribut	Description
OSMID	Identifiant unique de chaque nœud
X	Position X du nœud
Y	Position Y du nœud
STREET COUNT	Degré du nœud
HIGHWAY	Information sur la nature de l'intersection qui peut prendre différentes valeurs <ul style="list-style-type: none">○ <i>Crossing</i> : passage piéton○ <i>Traffic signals</i> : carrefour à signalisation lumineuse○ <i>Mini roundabout</i> : petit giratoire

Tableau 2: Résumé des attributs des nœuds du réseau OSM.

Attribut	Description
OSMID	Identifiant représentant une rue entière ; non unique pour chaque lien car plusieurs liens composent une même rue
U	Identifiant du nœud de départ
V	Identifiant du nœud d'arrivée
ONEWAY	Information sur le sens unique (ou non) d'une rue. Peut prendre deux valeurs <ul style="list-style-type: none"> • True (ou 1) : Sens unique • False : Circulation dans les deux sens
LANES	Information sur le nombre de voies de circulation de la rue
NAME	Nom de la rue
HIGHWAY	Information pour la description des routes, notamment leur importance/classification dans le réseau routier. Les différentes valeurs possibles sont <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Primary/secondary/tertiary</i> : principales routes pour du TIM exprimant leur importance (du plus haut au plus bas) ○ <i>residential</i> : routes se trouvant dans des quartier/zones/rues résidentielles ○ <i>living street</i> : Routes résidentielles pour lesquels les piétons sont prioritaires (il s'agit de zone de rencontre) ○ <i>Unclassified</i> : route structurante pour le TIM qui ne possède pas de classification selon les valeurs ci-dessus ○ <i>service</i> : Route d'accès à certains lieux (parkings, etc) ; souvent utilisé avec attribut <i>service</i> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>pedestrian</i> : rue piétonne ○ <i>track</i> : Routes avec accès restreint, souvent pour utilisation agricole ou forestière
SERVICE	Informations supplémentaires sur la route qui peut prendre les valeurs suivantes : <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>parking aisle</i> : parkings pour TIM ○ <i>driveway</i> : accès pour parkings privés
MAXSPEED	Limite de vitesse
LENGTH	Longueur du lien
JUNCTION	Information pour savoir s'il s'agit d'un giratoire, la valeur est alors <i>Roundabout</i>

Tableau 3: Résumé des attributs des liens du réseau OSM.

3.2.2 Zones vertes et étendues d'eau

Les données nécessaires sur les étendues d'eau et les zones vertes ont été téléchargées à travers OSMnx qui permet de télécharger d'autres données d'OSM en utilisant des combinaisons clé-valeur. Les données suivantes ont été récupérées pour la zone d'étude:

- les parcs à l'aide du tag *leisure* : *park*
- les forêts et étendues vertes à l'aide du tag *landuse* : *forest/grass*
- les étendues d'eau à l'aide du tag *natural* : *water*

3.2.3 Charge de trafic

Les données pour le TJM sont contenues dans un shapefile qui contient le réseau routier suisse sous forme de *lignes*, et chacune comporte des valeurs concernant la charge de trafic. La valeur de trafic utilisé pour ce travail est le trafic journalier moyen des jours ouvrables (de lundi à vendredi) noté *DWV* dans le fichier original. Cette valeur de charge de trafic est subdivisée pour les différents types de véhicules :

- *ALLE* : tous les véhicules
- *PW* : voiture particulière
- *LI* : camions de livraison
- *LW* : camions
- *LZ* : train de camions

3.2.4 Aménagements cyclables des rues

Les différents aménagements cyclables et leur emplacement présents dans le jeu de données de la ville de Lausanne sont :

- Bande cyclable
- Contresens
- Piste cyclable
- Trottoir autorisée aux cycles
- Voie de bus autorisée aux cycles
- Voie de liaison

Chaque aménagement cyclable est représenté par une ligne qui trace la forme et la position exacte de l'aménagement.

3.2.4.1 Aménagements cyclables des intersections

Les différents aménagements pour les intersections et leur répartition selon le jeu de données de la ville de Lausanne sont :

- Sas vélo
- Tourner à gauche indirect
- Tourner à droite au feu rouge
- Pré-sélection
- Boîte à feu vélo

Dans ce travail, les boîtes à feu vélo n'ont pas été prises en compte, car leur potentiel effet positif dépend de leur interaction avec les signalisations pour le trafic motorisé et les piéton-ne-s, et explorer ces données sort du cadre de ce travail. Néanmoins, la présence d'une boîte à feu vélo signifie la présence d'une pré-sélection facilement accessible et séparée du trafic pour les cycles ; cette configuration a été intégré dans ce travail comme pré-sélection.

3.3 Langages de programmation et logiciel

3.3.1 Langages de programmation

Python

Python (version 3.9.7) est un langage de programmation orienté objet. Python est open source, populaire et contient de nombreux packages spécialisés sur certains domaines qui permettent une analyse complète et en profondeur des données à disposition. Il existe une très grande communauté d'utilisateur-trice-s pour répondre aux différents problèmes et qui met à disposition gratuitement ces codes. L'utilisation de Python permet d'avoir une certaine automatisation des processus de préparation et d'analyse des données. Ce langage est utilisé dans ce travail pour la préparation des données, l'analyse de la qualité cyclable ainsi que l'application de routing. Pour ce travail, différents packages ont été utilisés et les plus essentiels sont présentés.

OSMnx (version 1.1.2) est un package développé par Geoff Boeing qui permet de télécharger des données géospatiales d'OSM, de les prétraiter et de les analyser (Boeing, 2017). Ce package a été utilisé pour télécharger le réseau cyclable OSM et les zones vertes et étendues d'eau de la ville de Lausanne. Puis, pour simplifier le réseau et ajouter les données d'élévation au nœud.

Pandas (version 1.4.2) est un package qui permet de travailler et d'analyser des données en format *dataframe*, c'est-à-dire sous forme de tableau. *Geopandas* (version 0.10.2) est un package se basant sur *Pandas* qui permet d'intégrer la spatialité des données à travers une colonne obligatoire, la *geometry*. Ces deux packages ont été utilisé pour préparer et analyser les données.

NetworkX (version 2.7.1) est un package qui donne la possibilité de travailler avec des graphes pouvant représenter des réseaux complexes. Ce package a été utilisé pour créer le graphe à partir des données OSM et pour déterminer le chemin le plus court sans tenir compte des intersections.

Flask (version 2.0.3) est un *framework* web Python qui facilite la création d'applications web en langage Python en mettant à disposition différents outils et fonctionnalités, notamment en récupérant les url des fichiers HTML, CSS et Javascript nécessaires pour construire une page web. Dans ce travail, *Flask* est utilisé pour l'application de routing et permet de faire le lien entre les fichiers HTML, CSS et Javascript avec les données et l'algorithme de routing.

HTML, CSS, Javascript

Dans le développement web standard, 3 langages de programmation sont utilisés : HTML, CSS et Javascript.

Le HTML (pour *HyperText Markup Language*) est un langage de balise qui permet de structurer une page web. Cela permet de définir des paragraphes, des boutons, des liens, des images. Un fichier HTML est lu par un navigateur web qui construit la page web selon ce qui est défini.

CSS (pour *Cascading Style Sheets*) est le langage de règles de style qui définit la présentation de la page web dans le navigateur. On peut modifier la police d'écriture, déterminer la position et la taille des éléments dans le navigateur web.

Javascript est le langage de programmation qui permet de créer du contenu mis à jour de façon dynamique en fonction de l'interactivité de l'utilisateur-trice avec la page web.

Les 3 couches interagissent et se superposent entre elles pour former une page web comme le montre la Figure 13.

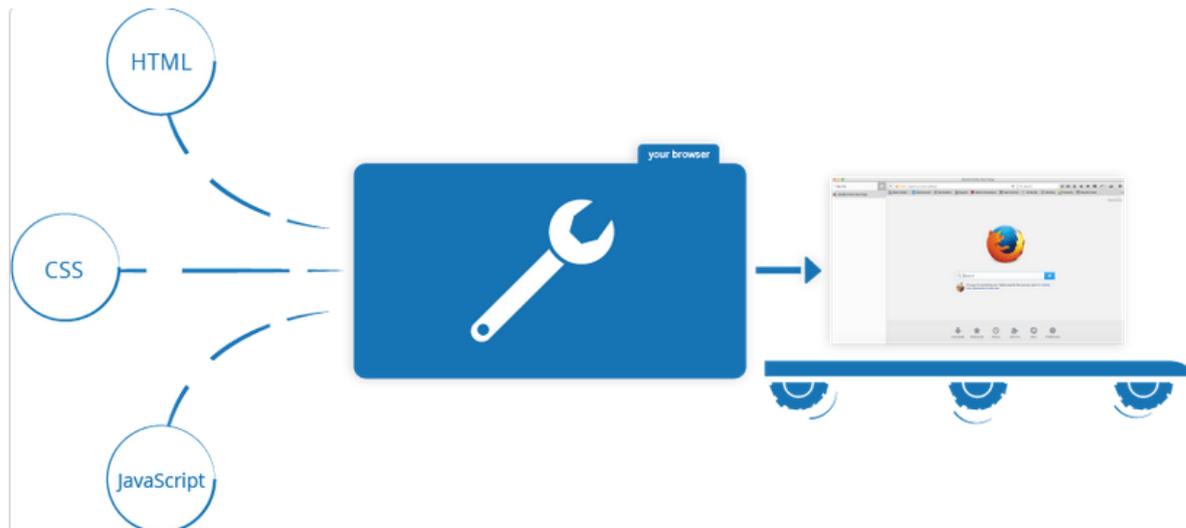


Figure 13: Visualisation du fonctionnement d'une page web avec les fichiers HTML, CSS et Javascript (https://developer.mozilla.org/fr/docs/Learn/Javascript/First_steps/What_is_Javascript#une_d%C3%A9finition_g%C3%A9n%C3%A9rale).

Javascript possède de nombreuses librairies qui sont des bibliothèques de fonctions facilitant le développement d'applications web. Les librairies Javascript utilisés dans l'application sont brièvement présentés.

Leaflet est une librairie qui permet de créer des cartes interactives avec différents fonds de carte et d'ajouter des couches de données. Comme il s'agit d'une librairie Javascript, elle donne la possibilité d'interagir facilement avec la carte et les différentes couches.

Leaflet-geosearch est une librairie qui permet de mettre en place du *geocoding*, c'est-à-dire la recherche d'adresse. Malgré son nom, cette librairie fonctionne indépendamment de Leaflet.

Logiciels

QGIS est un SIG *open-source* utilisé dans ce travail pour la préparation des données ainsi que l'exploration et la cartographie de la qualité cyclable. QGIS est écrit en langage python.

R est un langage de programmation *open source* spécialisé dans l'analyse statistique. Il possède aussi différentes librairies qui permettent une analyse approfondie des données. Ce langage a été utilisé pour réaliser certains graphiques pour le cadre opératoire et la présentation des résultats.

4. Cadre opératoire

Après avoir présenté le territoire, les données et les outils utilisés pour ce travail, il est nécessaire de s'arrêter sur les différentes marches à suivre définies pour évaluer la qualité cyclable de la ville et pour développer l'application de routing. Tout d'abord, la méthode pour l'évaluation de la qualité cyclable des rues et des intersections est présentée, suivie de la préparation et la mise en forme des données pour réaliser cet examen. Finalement, le design fonctionnel de l'application de routing est présenté. Tous les scripts de code développés dans le cadre de ce travail sont disponibles en ligne sur la plateforme GitHub (https://github.com/romgotz/application_routing). Les scripts concernant la préparation des données et l'évaluation de la qualité cyclable sont contenus dans le dossier *script* ; tous les autres fichiers sont utilisés pour l'application.

4.1 La qualité cyclable des rues

Pour déterminer la qualité cyclable des rues, c'est le réseau cyclable Open Street Map (OSM) de la ville de Lausanne qui est utilisé et est représenté à travers un graphe. Les différentes rues et routes du réseau sont les liens qui connectent les nœuds qui sont ici soit des croisements de routes, soit des courbures au sein même d'une rue. Pour chaque lien, la qualité cyclable est évaluée en prenant en compte différentes variables utilisées pour déterminer le coût multiplicateur et la distance perçue du lien (Grigore et al., 2019). La distance perçue est obtenue en multipliant la longueur originale de chaque lien OSM par le coût multiplicateur associé. Une bonne qualité cyclable entraîne un coût inférieur à 1 alors qu'une mauvaise qualité cyclable entraîne un coût supérieur à 1. Une mauvaise qualité cyclable entraîne une distance perçue plus grande que la distance originelle; la rue paraît plus longue à traverser que ce qu'elle est réellement (voir Figure 14). Au contraire, une bonne qualité cyclable entraîne une distance perçue plus courte que la distance originelle.

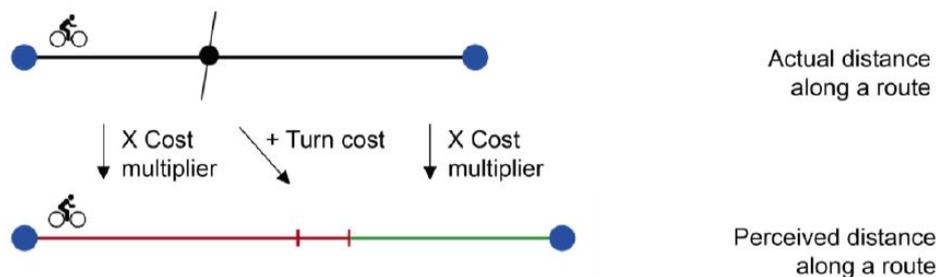


Figure 14: Visualisation de la distance perçue le long d'un trajet (Grigore et al., 2019)

Le coût multiplicateur est déterminé en se basant sur les facteurs importants du potentiel d'accueil du territoire quant à la pratique du vélo présentés dans la section 2.3. Les variables retenues sont réparties en quatre catégories : la topographie, les infrastructures cyclables en lien avec le TJM et la vitesse, l'attractivité de l'environnement et la présence de poids lourds dans le trafic. Le coût multiplicateur final s'obtient comme l'addition de tous les coûts et la soustraction du bénéfice :

$$C_{Lien} = C_T + C_{IC} + C_{PL} - B_{AE}$$

Avec C_{Lien} le coût total pour le lien, C_T le coût concernant la topographie, C_{IC} le coût des infrastructures cyclables, C_{PL} le coût lié aux poids lourds, et B_{AE} le bénéfice de l'attractivité de l'environnement.

Etant donné que les coûts multiplicateurs s'additionnent, il faut définir une situation avec une qualité cyclable considérée comme neutre pour laquelle les coûts s'additionnent à 1 ; la distance perçue est alors la même que la distance originelle. Le coût associé aux infrastructures cyclables est le plus complet puisqu'il prend en compte le TJM et la vitesse ainsi que les aménagements cyclables ; c'est donc cette catégorie qui se voit attribuée une valeur neutre de référence de 1 (Grigore et al., 2019). Les autres coûts et le bénéfice reçoivent eux des coûts avec une référence de 0.

4.1.1 Coût de la topographie

Une topographie avec une pente positive trop forte est perçue négativement par les cyclistes qui vont même jusqu'à faire un détour. En effet, une telle pente peut demander un effort physique très important et donner l'impression que la rue à parcourir est très longue (Broach et al., 2012; Menghini et al., 2010; OFROU, 2008). Le coût est relativement acceptable jusqu'à 5%, mais au-delà, les coûts deviennent rapidement plus grands. À l'opposé, une pente légèrement négative, de -6% à 0 %, est considérée comme bénéfique, car elle augmente la vitesse et demande moins d'effort aux cyclistes ; un coût négatif est attribué. Néanmoins, lorsque la pente négative devient plus importante, cela peut poser des problèmes au niveau de la sécurité avec une grande vitesse augmentant le risque d'accidents et leur sévérité ; le coût redevient alors positif.

Le coût de la pente suit une fonction non-linéaire se basant sur des normes VSS et dont la formule est (modifiée selon Grigore et al., 2019) :

$$C_{GR} = 40 \times GR \times (GR + 0.06)$$

Fonction du coût pour la topographie

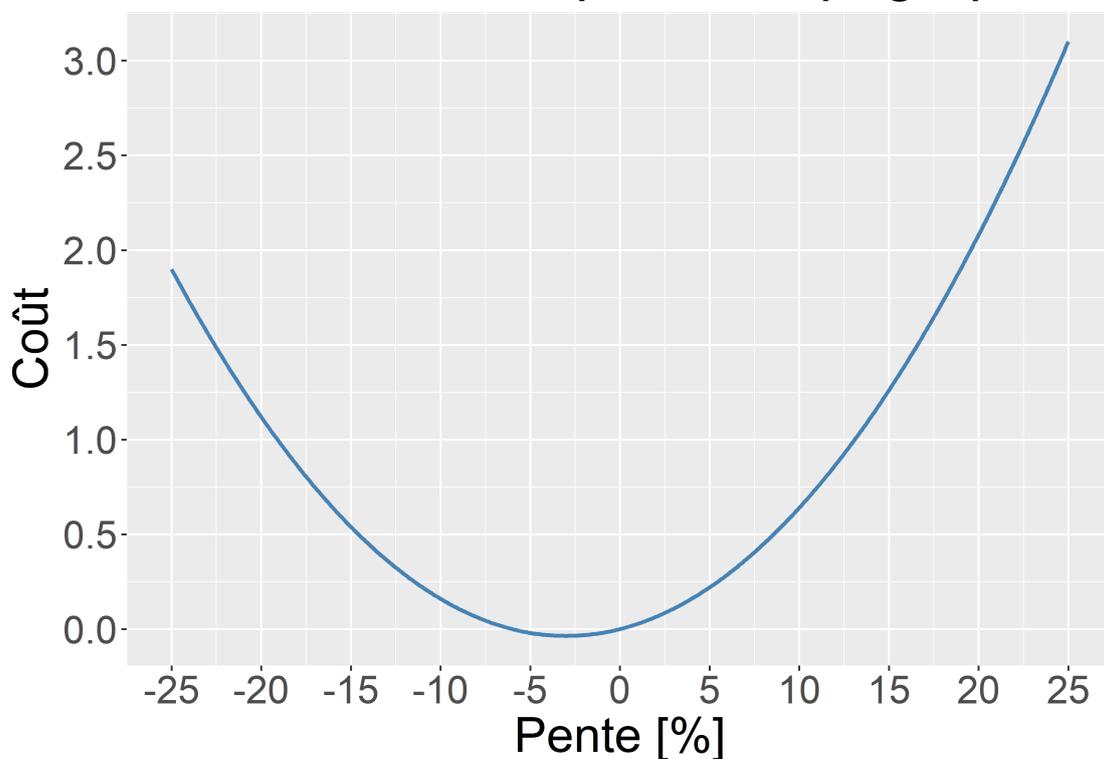


Figure 15: Fonction du coût pour la topographie en fonction de la pente en [%].

4.1.2 Coût associé aux infrastructures cyclables

La deuxième catégorie concerne les conditions de circulation sur les routes pour les cyclistes à travers la présence ou l'absence d'infrastructures cyclables en fonction du TJM et de la vitesse. Pour les situations où les cycles se retrouvent directement dans le trafic, avec ou sans bande cyclable, des fonctions exponentielles sont définies pour le coût en fonction du TJM, et ce pour les différentes limites de vitesse possibles, à savoir 30, 40, 50, 60 et 80 km/h. Les fonctions exponentielles sont de la forme suivante (Grigore et al., 2019):

$$C_{IC} = f x e^{g x TJM} + h$$

C_{IC} est le coût attribué, TJM est le trafic journalier moyen (en véhicules/jour), alors que f, g, h sont des paramètres à faire varier. Le paramètre f permet de modifier la valeur à partir de laquelle l'augmentation devient exponentielle, g détermine la rapidité de cette augmentation alors que h permet de définir où la fonctionne croise l'axe y .

La perception de sécurité des cyclistes dans le trafic dépend du TJM et de la vitesse. Pour une vitesse limitée à 30 km/h et une charge de trafic considéré comme faible (< 3'000 véhicules/jour), des aménagements ne sont pas nécessaires. De telles conditions peuvent même être perçues comme légèrement positives par les cyclistes car elles peuvent permettre d'éviter un trafic important sur les routes principales (Broach et al., 2012; Krenn et al., 2015; OFROU, 2008; Winters et al., 2013). Dès lors que la vitesse dépasse les 30 km/h et que le TJM dépasse les 3'000 véhicules/jour, il est nécessaire de prendre des mesures pour les cyclistes à travers des bandes cyclables ou des voies de bus autorisées aux cycles (OFROU, 2008). À partir d'une charge de trafic journalière dépassant les 10'000 véhicules/jour, il est recommandé de séparer les cyclistes du trafic ou de proposer des bandes cyclables très larges qui peuvent avoir un effet similaire (OFROU, 2008). Cette mesure devient encore plus nécessaire lorsque la vitesse dépasse les 50 km/h, et les effets négatifs en absence de mesures sont encore plus importants, même avec une charge de trafic plus basse (OFROU, 2008).

En tenant compte des recommandations de l'OFROU et des résultats des études discutés dans la partie 2.3, différentes fonctions sont déterminées. Pour une rue limitée à 30 km/h, tant que le TJM est en-dessous de 5'000 véhicules/jour, les conditions sont bonnes pour les vélos ; le coût est plus bas que 1. Entre 5'000 et 15'000 véhicules le coût sera juste au-dessus de 1 avant d'augmenter exponentiellement lorsque le TJM dépasse les 15'000 véhicules. Pour les autres limites de vitesse, la réflexion est identique, mais le coût ne sera jamais en dessous de 1 à partir de 50 km/h, car il est considéré qu'une faible charge de trafic ne contrebalance pas le manque de sécurité causé par la forte importance du différentiel de vitesse entre les cycles et le trafic motorisé. Cette différence de vitesse importante entraîne aussi une augmentation exponentielle plus précoce avec une augmentation de la vitesse du trafic motorisé. Les courbes définies sont visibles dans les Figure 16, Figure 17 et Figure 18 et leurs équations sont résumées dans le Tableau 4.

Fonctions du coût pour les aménagements cyclables en fonction de la vitesse et du TJM

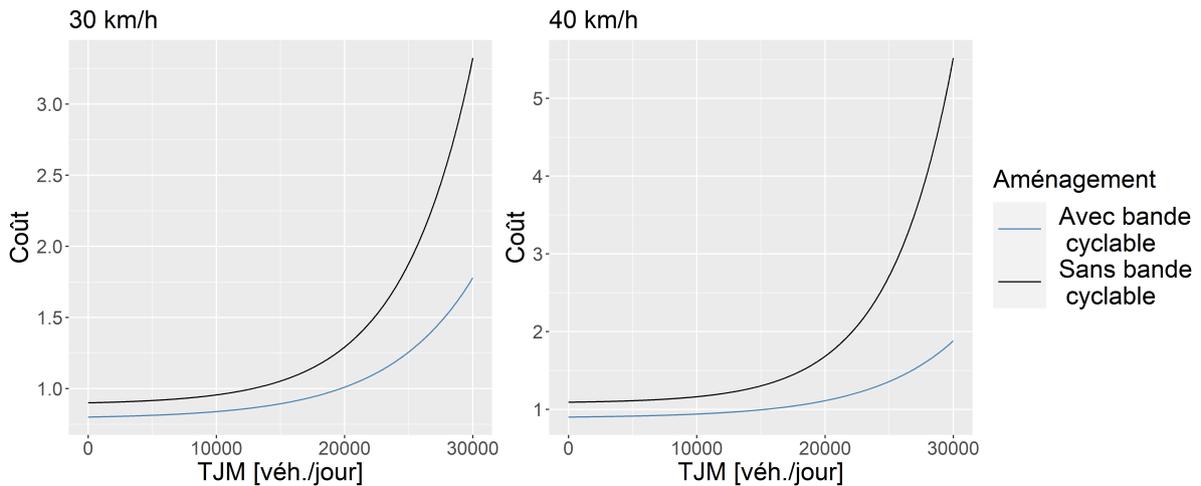


Figure 16: Représentations des fonctions du coût des infrastructures cyclables selon le TJM et la vitesse pour 30 km/h et 40 km/h.

Pour améliorer la sécurité des cycles dans le trafic, les deux aménagements principaux en ville de Lausanne sont les bandes cyclables et les voies de bus autorisées aux vélos. Dans leur travail, Grigore et al. (2019) considèrent les voies de bus comme des bandes cyclables. Néanmoins, il paraît important de faire une distinction entre les deux aménagements qui possèdent des caractéristiques différentes. Pour des vitesses dépassant les 30 km/h notamment, les voies de bus améliorent la perception de sécurité en permettant d’être mieux séparé du trafic motorisé, même s’il existe une cohabitation avec les bus (Adams & Aldred, 2020; Cazorla, 2017).

Fonctions du coût pour les infrastructures cyclables en fonction de la vitesse et du TJM

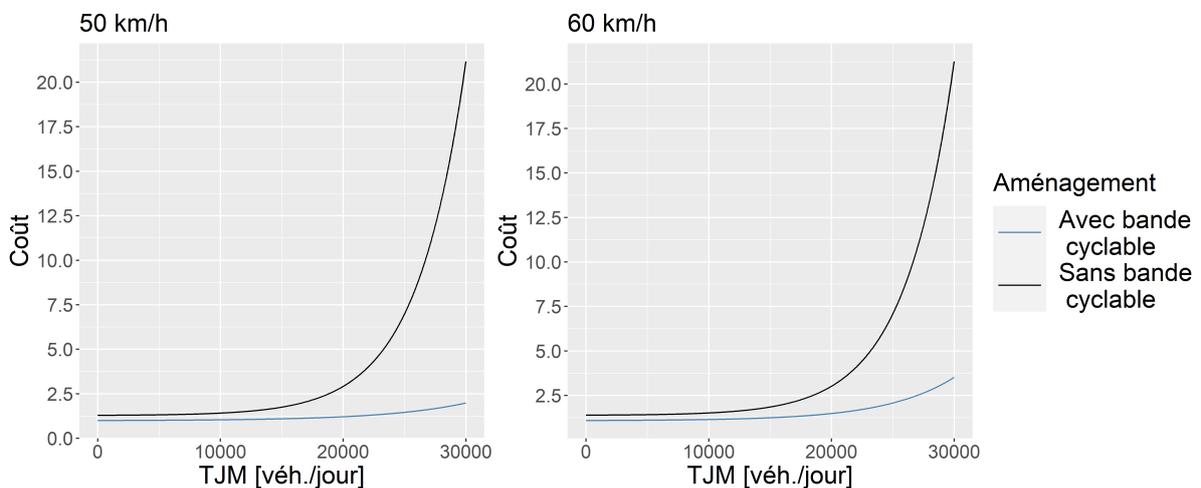


Figure 17: Représentations des fonctions du coût des infrastructures cyclables selon le TJM et la vitesse pour 50 km/h et 60 km/h.

Fonction du coût pour les infrastructures cyclables en fonction de la vitesse et du TJM

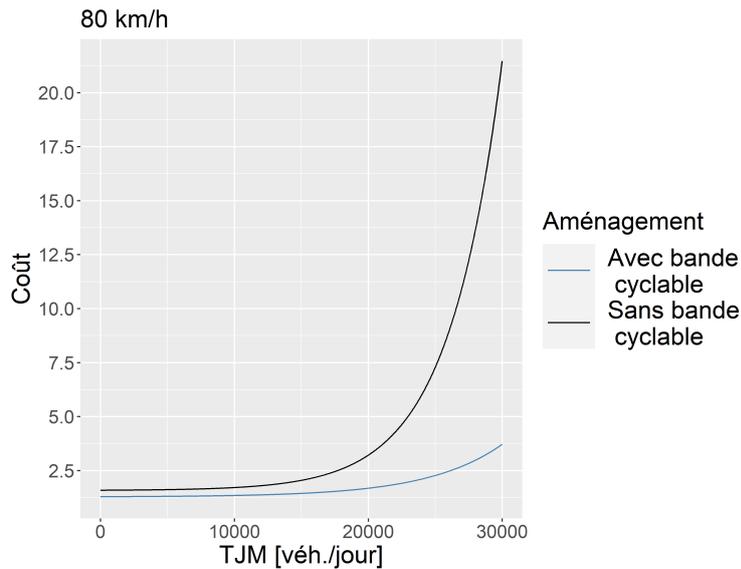


Figure 18: Représentation de la fonction du coût des infrastructures cyclables selon le TJM pour 80 km/h.

En tenant compte de ceci, il est considéré que les voies de bus offrent un effet positif pour la qualité cyclable légèrement plus grand que les bandes cyclables. Aucune distinction n'est faite pour la vitesse, car il est décidé que la vitesse du trafic n'est presque plus perçue dans une voie de bus. De plus, seulement 4 liens sur 100 ont une vitesse différente de 50 km/h. À l'instar des voies de bus, les autres infrastructures cyclables permettent une séparation du trafic motorisé et font ainsi disparaître l'influence du TJM et de la vitesse. Les pistes cyclables obtiennent un coût constant de 0.75 au vu de la préférence affichée des cyclistes pour une séparation complète du trafic. Les infrastructures qui engendrent une cohabitation avec les piétons reçoivent un coût plus élevé que les pistes cyclables, car cela peut engendrer des conflits de cohabitation et souvent la nécessité de diminuer sa vitesse (Grigore et al., 2019). Les trottoirs autorisés aux vélos se voient attribués un coût de 0.9 car il y a toujours une séparation marquée entre l'espace pour les cycles et celles des piétons en ville de Lausanne. Les zones piétonnes reçoivent un coût de 0.95 car elles sont considérées comme plus fréquentées et que les cyclistes doivent rouler au pas. Concernant les zones de rencontre, même si le trafic motorisé y est autorisé, il est estimé que celui-ci ne joue pas un rôle important puisqu'il est très faible et avec une vitesse modérée. Les zones de rencontre se voient donc attribuer un coût constant de 0.9 au vu de la présence plus faible de piéton-ne-s par rapport à une zone piétonne. Finalement, la présence de poids lourds est considérée comme négative pour la sécurité et le confort des cyclistes (OFROU, 2008). Un coût additionnel de 0.2 est ajouté dans le cas où le pourcentage de poids lourds dans le trafic dépasse 8%. Pour faire la distinction avec les coûts liés à la présence ou l'absence des infrastructures cyclables, ce coût est ajouté indépendamment en tant que C_{PL} .

Limite de vitesse	Type d'infrastructure	Coût associé
30 km/h	Aucune	$0.011 x e^{0.00018 x TJM} + 0.889$
	Bande cyclable	$0.011 x e^{0.00015 x TJM} + 0.789$
40 km/h	Aucune	$0.011 x e^{0.00020 x TJM} + 0.989$
	Bande cyclable	$0.011 x e^{0.00020 x TJM} + 0.889$
50 km/h	Aucune	$0.011 x e^{0.00025 x TJM} + 1.280$
	Bande cyclable	$0.011 x e^{0.00020 x TJM} + 0.989$
60 km/h	Aucune	$0.011 x e^{0.00025 x TJM} + 1.380$
	Bande cyclable	$0.011 x e^{0.00020 x TJM} + 1.180$
80 km/h	80 km/h sans bande cyclable	$0.011 x e^{0.00025 x TJM} + 1.580$
	Bande cyclable	$0.011 x e^{0.00020 x TJM} + 1.380$
/	Voie de bus autorisée au vélo	0.85
	Piste cyclable	0.75
	Zone de rencontre	0.9
	Zone piétonne ouverte aux vélos	0.95
	Trottoir autorisé aux cycles	0.9
	Contresens	Considéré comme lien sans aménagement cyclable
/	% de poids lourds	0.2

Tableau 4: Récapitulatif des coûts pour les cyclistes selon les différentes infrastructures et limites de vitesse.

4.1.3 Bénéfice de l'attractivité de l'environnement

Le dernier attribut est le possible bénéfice lié à l'attractivité de l'environnement. Le pourcentage de zones vertes ou d'étendues d'eau améliore la perception positive des cyclistes pouvant même mener à une baisse de la perception du temps parcouru (Krenn et al., 2015; OFROU, 2008; Stefánsdóttir, 2014). Le bénéfice est défini par une fonction non-linéaire (Figure 19) dans laquelle les effets positifs deviennent importants à partir de 20 % et qui stagnent à partir de 40-50 % (Grigore et al., 2019).

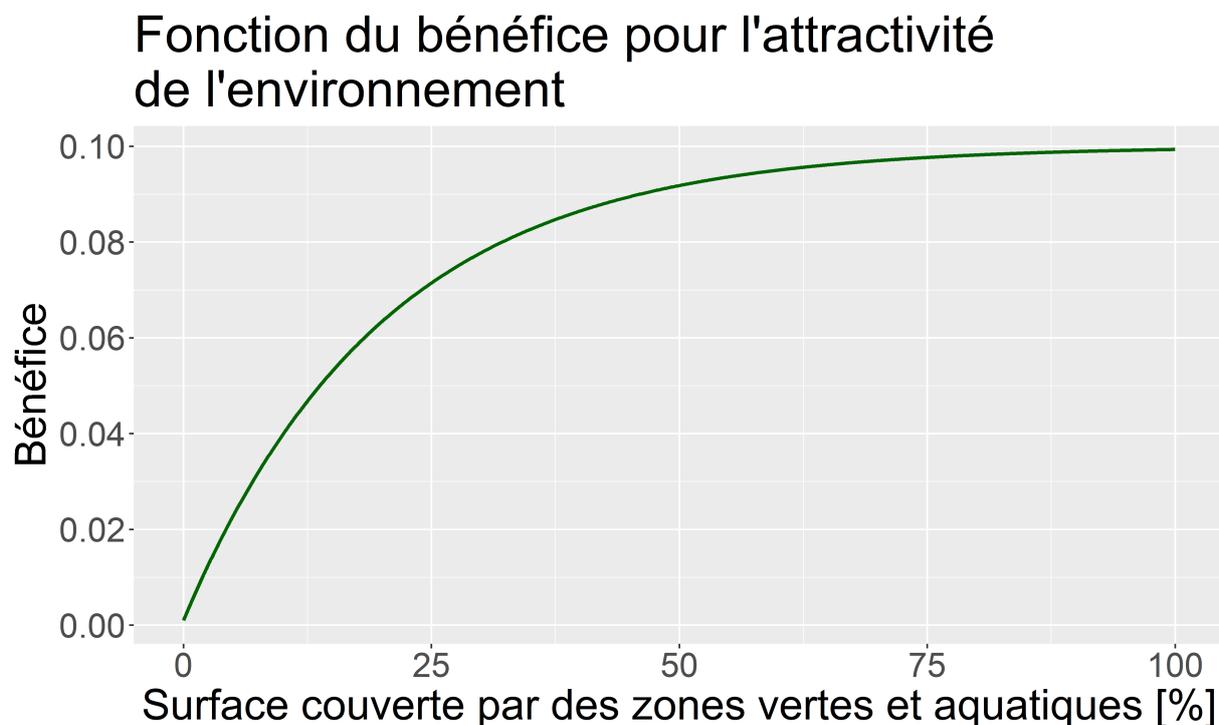


Figure 19: Fonction du bénéfice de la présence de zones vertes et d'étendue d'eau en fonction du pourcentage d'espace recouvert.

La formule du bénéfice est (Grigore et al., 2019):

$$B_{AE} = 0.1 - \frac{0.1}{0.01 + e^{0.05 \times C_{VW}}}$$

4.2 Qualité cyclable des intersections

Les intersections sont considérées comme les maillons faibles des itinéraires et sont le lieu d'une part élevée des accidents impliquant des cyclistes (Jensen, 2013; OFROU, 2021) (OFROU, 2021 ; Jensen, 2013). Les intersections sont perçues très négativement et comme dangereuses par les cyclistes qui sont prêt-e-s à faire un détour pour éviter des intersections, phénomène amplifié pour les cyclistes moins expérimenté-e-s (Broach et al., 2012; Menghini et al., 2010; OFROU, 2021). Il est donc important d'intégrer les intersections dans l'évaluation de la qualité cyclable d'un territoire. Même si certaines méthodologies existent, les intersections ont relativement peu été intégrées lors de l'évaluation de la qualité cyclable. Le travail le plus complet, à ma connaissance, vient du travail de Grigore et al. (2019) qui est utilisé comme base de travail.

Une méthodologie similaire aux liens est utilisée, mais elle nécessite quelques modifications. En effet, les intersections sont représentées par les nœuds du graphe et ne possèdent pas de longueur comme les liens. L'idée est de définir un coût exprimé directement en longueur selon différentes caractéristiques. Cette longueur, exprimée en mètres, peut être comprise comme le détour que les cyclistes seraient prêt-e-s à faire pour éviter une telle intersection (Broach et al., 2012 ; Grigore et al., 2019). Ensuite, ce coût peut être allongé ou raccourci selon la configuration du carrefour et la présence d'infrastructures pour les cycles (Grigore et al., 2019). Un coût générique de 67 mètres est défini pour chaque mouvement à travers une intersection étant donné que les cyclistes préfèrent éviter les intersections quelles que soient leurs types (Broach et al., 2012). À ce coût générique peut s'ajouter une longueur selon le type d'intersection, le mouvement du cycliste à travers l'intersection et les caractéristiques du carrefour.

4.2.1 Intersections avec signalisation lumineuse

Pour les carrefours avec signalisation lumineuse, un coût additionnel de base de 34 mètres est appliqué à cause de l'attente et de l'arrêt engendré par le feu de signalisation. Le coût de base est donc de 101 mètres (67 + 34 mètres) qui peut être amplifié ou réduit par certaines situations définies par des coûts multiplicateurs. Ces derniers multiplient le coût original de 101 mètres et peuvent donc allonger ou réduire le coût dans une perspective très similaire à la distance perçue pour les liens.

Les coûts multiplicateurs tiennent compte des différentes infrastructures cyclables permettant d'améliorer la sécurité et le confort des cyclistes dans le franchissement des intersections, mais aussi de certaines situations relevées comme dangereuses et qui peuvent entraîner des conflits avec le trafic motorisé. Parmi les configurations dangereuses, il y a la présence de plusieurs voies de circulation pour le trafic motorisé ou encore la présence potentielle d'un conflit avec une pré-sélection pour tourner à droite pour le trafic motorisé alors que les cycles continuent tout droit. La charge de trafic influence négativement la perception de sécurité et de confort des cyclistes ; un coût est défini si la charge de trafic devient trop importante.

Aménagements ou caractéristiques	Mouvement vélo		Coût multiplicateur
Sas vélo	Tourner à gauche	Facilement accessible	0,7
		Difficilement accessible	0,75
	Tout droit/à droite	Facilement accessible	0,8
		Difficilement accessible	0,85
Présélection vélo facilement accessible	Tourner à gauche	Facilement accessible	0,8
		Difficilement accessible	0,85
	Tourner à droite / aller tout droit	Facilement accessible	0,9
		Difficilement accessible	0,95
Tourner à gauche indirect	Gauche		0,8
Tourner à droite au feu rouge	Droite		0,85
Pré-sélection tourner à droite trafic motorisé	Droite	Avec bande cyclable rouge	1,1
		Sans	1,2
Plusieurs voies de circulation trafic motorisé	Tous		1,5
TJM	Tous	10'000 – 20'000	1,1
		> 20'000	1,3

Tableau 5: Coût multiplicateur additionnel dû aux aménagements cyclables possibles ou à certaines caractéristiques dangereuses.

Différentes infrastructures cyclables peuvent être mises en place pour contrebalancer ces effets négatifs. Il est possible de mettre en place un sas vélo aux carrefours avec signalisation lumineuse, une ligne d'arrêt avancée ou un tourner à gauche indirect. C'est le sas vélo qui entraîne la plus grande amélioration, car il augmente la sécurité et le confort sans entraîner d'attente supplémentaire, au contraire du tourner à gauche indirect qui augmente le temps de traversée et qui reçoit donc un coût multiplicateur légèrement plus grand. À noter que lorsqu'un sas vélo n'est pas facilement accessible, l'amélioration est moins significative. Pour le conflit entre un cycliste allant tout droit et le trafic motorisé tournant à droite, la présence d'une bande cyclable rouge diminue légèrement l'effet négatif. Les coûts multiplicateurs résumés dans le Tableau 5 se multiplient entre eux pour donner un coût multiplicateur total qui va ensuite multiplier le coût de 101 mètres.

4.2.2 Intersections sans signalisation lumineuse

Les intersections sans signalisation lumineuse possèdent un coût original de 67 mètres auquel peut venir s'ajouter un coût supplémentaire en fonction de la charge de trafic motorisé et du mouvement à réaliser (Tableau 6). En-dessous d'un TJM inférieur à 5'000 véhicules/jour, aucun coût supplémentaire n'est défini. Cette situation va même pour un TJM inférieur à 10'000 véhicules/jour pour un mouvement de tourner à droite. Le tourner à gauche reçoit les coûts les plus élevés, car il s'agit de la manœuvre la plus dangereuse pour les cyclistes alors que le tourner à droite reçoit les coûts les plus bas car de manière générale, cela ne nécessite pas de traverser le trafic. Finalement, le tout droit reçoit des coûts un peu moins élevés que le tourner à gauche car il représente moins de risque de conflit, mais peut rester problématique. Comme pour les carrefours avec signalisation lumineuse, le coût obtenu peut être multiplié par un coût multiplicateur. Dans le cas présent, seulement le coût associé au nombre de voies de circulation du trafic motorisé est pris en compte. Pour les intersections qui se font dans des quartiers résidentiels, aucun coût n'est rajouté, c'est-à-dire qu'il vaut 0 mètre.

Mouvement	TJM [véhicules/jour]	Coût [m]
Tourner à gauche	5'000-10'000	66
	10'000-20'000	147
	> 20'000	372
Tout droit	5'000-10'000	66
	10'000-20'000	94
	> 20'000	217
Tourner à droite	> 10'000	61

Tableau 6: Coûts pour les intersections sans signalisation lumineuse en fonction du mouvement du cycliste et du TJM (basé sur (Broach et al., 2012; Grigore et al., 2019; OFROU, 2021)).

4.2.3 Giratoires

Il est important de tenir compte des giratoires comme ils sont considérés comme les maillons faibles des itinéraires cyclistes (OFROU, 2021). À ma connaissance, aucune étude ou évaluation de la qualité cyclable ne définit de méthodologie particulière pour les giratoires. Ainsi, les coûts proposés sont des choix personnels se basant sur les recommandations de l'OFROU (2021) et la méthodologie de Grigore et al. (2019) pour les intersections. Dans ce travail, les petits giratoires et les grands giratoires sont distingués et la méthode pour définir le coût diffère.

Les petits giratoires sont des giratoires avec une seule voie d'entrée/de sortie et pour lesquels l'anneau de circulation est restreint. Ce type de giratoire est représenté dans le réseau OSM par un nœud avec comme variable *highway* : *mini_roundabout*. Les coûts définis sont assez faibles comme il s'agit d'une situation cyclo-conforme (OFROU 2021). Deux limites de vitesse sont envisagées, 30 km/h et 50 km/h, 30 km/h recevant les coûts les plus bas. De nouveau, la direction des cyclistes est importante. Ici, seulement deux mouvements sont différenciés : tourner à gauche/aller tout droit et tourner à droite. Ce dernier est de nouveau estimé comme moins problématique, car il ne nécessite pas de traverser le giratoire, mais peut néanmoins engendrer une attente et un arrêt avant de s'engager dans le giratoire. Le coût défini dans le Tableau 7 s'ajoute au coût originel de 67 mètres pour les intersections. À nouveau, si le petit giratoire se situe dans un quartier résidentiel, le coût originel de 67 mètres n'est pas pris en compte.

		30 km/h	50 km/h
Mouvement	TJM [véhicules/jour]	Coût [m]	Coût [m] (x1,5 de 30 km/h)
Tourner à droite	< 10'000	10	15
	> 10'000	30	45
Tourner à gauche/tout droit	< 10'000	30	45
	> 10'000	60	90

Tableau 7: Coûts pour un giratoire à une voie d'entrée/de sortie et une vitesse à 30km/h ou 50 km/h en fonction du mouvement des cyclistes et du TJM.

Les grands giratoires possèdent 2 voies d'entrée/ou de sortie ou un anneau de circulation très large, et la distance à traverser est bien plus importante. Il s'agit des giratoires les plus problématiques et sont vivement déconseillés pour les cycles (OFROU, 2021). Dans le réseau OSM, ce type de giratoire est représenté sous sa forme réelle et est composé de plusieurs liens. La méthodologie pour déterminer le coût de la traversée est ainsi un mélange entre la méthodologie pour les liens et les intersections. Un coût multiplicateur spécifique pour les grands giratoires est défini pour chaque lien

composant le giratoire en fonction de la vitesse et de la charge de trafic (Tableau 8); il s'agit en fait d'un remplacement du coût associé aux infrastructures cyclables. À ce coût viennent s'additionner les coûts pour la topographie et pour la présence de poids lourds dans le trafic, pour donner un coût multiplicateur :

$$C_{MG} = C_{Giratoire} + C_T + C_{PL}$$

Ici le bénéfice pour la présence d'étendues d'eau et de zones vertes n'est pas pris en compte. De plus, dans le cas d'un coût pour une déclivité négative, ce dernier n'est pas ajouté car il est considéré que cela n'améliore pas les conditions de sécurité et de confort au sein d'un tel giratoire.

Comme pour les liens, ce coût multiplicateur est ensuite utilisé pour multiplier la distance de chaque lien et obtenir la distance perçue. Le coût final pour traverser un grand giratoire, exprimé en mètres, sera l'addition des distances perçues de chaque lien composant la traversée du giratoire, auquel vient s'ajouter le coût de 67 mètres de base défini pour un mouvement à travers une intersection. Par cette marche à suivre, les mouvements pour tourner à droite vont recevoir un coût plus faible à cause de leur faible distance à parcourir pour traverser un giratoire alors que les mouvements pour tourner à gauche et pour aller tout droit recevront des coûts plus élevés puisque la traversée du giratoire demande un plus grand parcours.

TJM [véhicules/jour]	Coût associé (selon la vitesse et le TJM)	
	30 km/h	50 km/h
<5'000	1.1	1.3
5'000 – 15'000	1.2	1.5
>15'000	1.5	2

Tableau 8: Coûts pour les grands giratoires ayant un plus grand anneau de circulation en fonction de la vitesse et de la charge de trafic

4.3 Mise en forme des données

Dans le cadre de ce travail, les différents jeux de données ont dû être préparés et mis en forme afin de pouvoir appliquer les méthodologies d'évaluation de la qualité cyclable présentés ci-dessus. L'objectif de la préparation des données était de construire le réseau cyclable pour la ville de Lausanne contenant toutes les informations nécessaires à l'évaluation de la qualité cyclable. Pour atteindre cet objectif, il a fallu préparer chacun des jeux de données, puis les assembler.

4.3.1 Réseau cyclable OSM

Le réseau cyclable OSM téléchargé est sous la forme d'un *multigraphe dirigé*. Dans ce graphe, les liens sont des segments de routes du réseau de transport entre deux nœuds. Les nœuds du réseau OSM ne sont pas forcément des intersections, puisqu'une grande partie des nœuds sont *interstitiels*. Dans OSM, les nœuds vont suivre la courbure des routes, ce qui permet de représenter au plus près la forme du réseau. Néanmoins, cette spécificité implique un réseau comportant énormément de nœuds et de liens. Ainsi, le réseau cyclable téléchargé pour la ville de Lausanne en septembre 2022 possède originellement 45'399 liens and 23'423 nœuds. Comme le nombre de liens et de nœuds étaient très élevés, il a fallu simplifier le réseau. Le package OSMnx possède plusieurs fonctionnalités qui permettent ceci sans perdre d'informations. Tout d'abord, le package contient un processus de simplification qui permet de réduire le nombre de nœuds et de liens. Pour ceci, une partie des nœuds interstitiels est enlevée en assemblant les différents segments d'une route pour former des liens plus longs. Pour déterminer les nœuds interstitiels, c'est le degré des nœuds qui est utilisé en sélectionnant les nœuds qui ne sont pas des intersections. Après cette simplification, le réseau comporte 3'551 nœuds et 7'157 liens. OSMnx permet aussi de *consolider* les nœuds, c'est-à-dire d'enlever les nœuds qui sont des culs-de-sac et des *self-loop* (un nœud qui amène à lui-même).

OSMnx permet aussi de transformer le graphe du réseau OSM en *GeoDataFrame*, un format de données très utilisé dans le langage de programmation python avec les packages *Pandas* et *Geopandas*. Le réseau OSM est séparé en deux : un *GeoDataFrame* pour les liens et un autre *GeoDataFrame* pour les nœuds. La *GeoDataFrame* des liens est tout simplement la liste des liens du réseau qui permet d'accueillir tous les attributs des liens évoqués.

Ce format de données a notamment permis d'affiner le réseau téléchargé en enlevant certains liens non nécessaires selon les attributs. Les liens avec les attributs et valeurs suivants ont été enlevés :

- *Service* : *parking aisle /driveway*
- *Highway* : *service/path /track*

D'autres liens ont ensuite été manuellement enlevés sur QGIS afin d'alléger le réseau et le rendre plus facilement visible dans les cartes présentées. Les différents liens enlevés sont :

- des liens isolés et non connectés au reste du réseau (à cause du traitement automatique plus haut).
- des rues qui menaient à des culs-de-sac dans des quartiers résidentiels.

4.3.2 Topographie

Le package OSMnx possède une fonctionnalité pour ajouter une valeur d'altitude pour chaque nœud d'un graphe à l'aide d'un fichier raster. Le Modèle Numérique de Terrain de Swisstopo¹ a été utilisé pour ajouter une altitude à chaque nœud. Puis la pente moyenne de chaque lien a été calculée selon la formule suivante :

$$\frac{\text{noeud } u - \text{noeud } v}{\text{Longueur du lien}}$$

4.3.3 Limite de vitesse du trafic

Pour la limite de vitesse, les données présentes dans le réseau OSM avec l'attribut *maxspeed* ont été utilisées. Néanmoins, elles nécessitent d'être complétées puisque 1'548 liens se trouvaient sans valeur de limite de vitesse. De plus, il était important de s'assurer que les zones à 30 km/h et les zones de rencontre étaient correctement implémentées dans le réseau étant donné leur importance dans l'évaluation de la qualité cyclable.

Pour compléter les données OSM, ce sont les données de la ville de Lausanne sur les zones modérées qui ont été utilisées. L'ajout de ces données sur les liens OSM s'est fait de la manière suivante :

- *Joindre les attributs par localisation* entre les liens OSM et les zones de vitesse modérée
 - Les liens OSM se voient ainsi attribuer un nouvel attribut nommé *Speed_zone* qui définit si le lien se trouve dans une zone de rencontre ou une zone 30 km/h.

Les zones modérées ont permis de compléter les données manquantes ou de corriger des valeurs erronées. Finalement, certains liens ne possédaient toujours pas de valeurs de limite de vitesse après cette étape ; il a été décidé que la limite de vitesse serait fixée à 50 km/h qui correspond à la vitesse majoritaire pour la ville de Lausanne.

4.3.4 Zones vertes et étendues d'eau

Pour déterminer le pourcentage de surface recouvert par des zones vertes ou des étendues d'eau autour des liens OSM, la marche à suivre a été :

- Détermination d'une zone tampon de 10 m autour des liens OSM et calcul de la surface de chaque lien sous forme d'une zone tampon ;
- Intersection entre les liens OSM sous la forme d'une zone tampon et les différentes zones vertes et d'eau
 - Calcul de la surface des polygones restants
 - Calcul du pourcentage de chaque lien OSM avec zone tampon recouvert par surface de zones vertes et d'eau en utilisant la formule suivante

$$\frac{\text{Surface polygone intersection}}{\text{Surface lien avec buffer}} * 100$$

¹ <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/alti3d.html>.

- *Joindre les attributs par localisation* pour ajouter les nouvelles données calculées aux liens OSM originels (sans zone tampon)
 - Paramètres : *Intersecte avec Prendre uniquement les attributs de l'entité qui a le plus grand chevauchement (un à un), Passer (ignorer) les entités avec des géométries invalides*

4.3.5 Charge de trafic

La préparation des données pour le trafic s'est révélée plus compliquée qu'anticipée. En effet, le réseau de transport OSM et le réseau de transport utilisé dans le Modèle national de trafic voyageur (MNTP)² de la confédération ne correspondent pas exactement. Pour les deux réseaux, le sens de circulation est pris en compte pour certains tronçons de routes représentés alors par deux liens avec une géométrie différente (un pour chaque sens de circulation). Néanmoins, pour la majeure partie des routes, le sens de circulation n'est pas prise en compte et il existe un même lien qui peut être traversé dans les 2 sens. La difficulté est que les tronçons de route ne correspondent pas forcément entre les deux réseaux. Il a donc été décidé de ne pas tenir compte du sens de circulation du réseau MNTP pour les valeurs de trafic. Les valeurs de trafic du réseau routier suisse ont été ajoutées au réseau OSM comme suit :

- *Zone tampon* de 2 mètres autour des liens OSM
- *Joindre les attributs par localisation* entre la couche des liens OSM avec zone tampon et la couche du MNTP
 - Paramètres : *Intersecte avec Prendre uniquement les attributs de l'entité qui a le plus grand chevauchement (un à un), Passer (ignorer) les entités avec des géométries invalides*
- *Joindre les attributs par localisation* entre le résultat de la ligne précédente et les liens OSM

² <https://www.are.admin.ch/mntp>

En réalisant ceci, il y avait toujours environ 2'300 liens OSM qui ne possédaient pas de données concernant le trafic. Il a été décidé de prédire les données manquantes en utilisant la méthode d'interpolation du *Inverse Distance Weighting*. L'idée derrière cette méthode est assez simple ; une valeur inconnue est prédite en fonction de ses voisins ; plus le voisin est proche, plus il influence la valeur prédite. Il s'agit d'une moyenne pondérée par la distance. Les formules mathématiques derrière cette idée sont (Tieppo, 2018) :

$$w(x) = \frac{A}{B}$$

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p} u_i$$

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x, x_i)^p}$$

Avec w = valeur prédite , d = distance, x = le point inconnu, x_i = le i -ème point, u_i = la valeur du i -ème point, p = puissance (souvent 2). Il faut donc définir le nombre de voisins dont il faut tenir compte et la distance mesurée. Pour ce travail, le nombre de voisins a été défini arbitrairement à 20 et la distance utilisée est la distance euclidienne.

Dès lors que toutes les routes, en dehors des rues piétonnes, possédaient des valeurs de charge de trafic, il a été possible de calculer le pourcentage de poids lourds dans le trafic en utilisant la formule générique suivante :

$$\frac{Trafic_{LI} + Trafic_{LW} + Trafic_{LZ}}{Trafic_{ALLE}} * 100$$

Il est important de noter que la méthode d'interpolation du *IDW* n'est pas parfaite et possède quelques limitations dans le cadre spécifique de ce travail et la prédiction de la charge de trafic. Tout d'abord, le trafic peut être très différent d'une route à l'autre, donc certaines routes proches de grands axes routiers peuvent se retrouver avec des valeurs de trafic plus élevés qu'en réalité. Pour éviter des gros écarts, les valeurs de trafic ont été lissées en calculant la moyenne des valeurs de trafic pour les routes qui n'étaient pas des routes principales. De plus, l'écart de valeurs de trafic utilisées pour déterminer la qualité cyclable est assez large (de l'ordre de 1'000 véhicules), donc les résultats sont quand même utilisables.

4.3.6 Aménagements cyclables des rues

L'ajout des aménagements cyclables a été effectué manuellement sur QGIS. En effet, l'ajout automatique des données a été explorée, mais s'est vite révélé compliqué et a été abandonné. La difficulté de l'ajout des données vient du fait que le réseau OSM, comme tout réseau de transport, est modélisée à travers un multigraphe dirigé. Pour deux liens entre les mêmes nœuds A et B, les infrastructures cyclables peuvent être différentes si on parcourt le lien de A et B ou de B et A. Une autre difficulté rencontrée vient de la différence de longueur des liens OSM et des lignes représentant les aménagements cyclables. Un aménagement cyclable peut s'arrêter au milieu de la longueur d'un lien OSM. Dans une grande partie des cas, les longueurs correspondent assez bien, mais pour les situations où ceci n'était pas le cas, ce sont les liens OSM non simplifiés qui ont été utilisés. En effet, les liens OSM non simplifiés sont très courts, et il était ainsi possible d'ajouter l'aménagement cyclable de manière plus précise jusqu'à son arrêt réel.

Les aménagements enregistrés comme voie de liaison ont dû être répartis selon les autres aménagements cyclables. En effet, il n'existe pas de définition précise d'une voie de liaison et il ne s'agit pas d'un aménagement cyclable spécifique. Les voies de liaison reflétaient différentes situations qui ont été réattribuées à des aménagements cyclables existants de manière manuelle lors de l'ajout des aménagements cyclables aux liens OSM. Les différentes situations rencontrées sont :

- Rues/passages dont l'accès est restreint pour le trafic motorisé (sans être une zone de rencontre), mais que les vélos peuvent emprunter : attribué comme piste cyclable
- Voie de liaison passant par des rue piétonnes : estimées comme une zone piétonne ouverte pour les vélos
- Voie de liaison passant par de grands parcs : considérées comme des pistes cyclables, même s'il s'agit de zones piétonnes, car l'espace pour circuler est très grand et les conflits avec les piétons sont considérés comme négligeables
- Voie de liaison passant par des zones de rencontre : attribuée comme des zones de rencontre

De plus, certains aménagements de voies de liaison représentent des passages qui n'étaient pas présents dans les liens OSM du réseau téléchargé ; certains liens ont dû être créés et ajoutés au réseau OSM. De plus, certains liens ont été enlevés du réseau par erreur lors de la simplification automatique du réseau ; ces liens ont donc à nouveau été ajoutés au réseau.

Il a aussi été nécessaire de compléter les aménagements cyclables du jeu de données de la ville de Lausanne avec les zones de rencontre et les zones piétonnes ouvertes aux cycles.

Pour les zones de rencontre, elles ont été ajoutées avec l'attribut *speed_zone* défini lors de l'ajout des limites de vitesse. Pour les zones piétonnes, ce sont les données du réseau OSM qui ont été utilisées en considérant l'attribut *highway : pedestrian*. Les liens enregistrés comme tels sont estimés comme interdits aux cycles, sauf s'il y a la précision de la présence d'un aménagement cyclable qui autorise les vélos à circuler.

4.3.7 Aménagements cyclables des intersections

L'ajout des aménagements pour les intersections s'est aussi réalisé de manière manuelle en utilisant QGIS. Néanmoins, il n'est pas possible d'ajouter directement les données pour les intersections aux liens du réseau OSM. Comme expliqué plus haut, le mouvement à travers une intersection joue un rôle extrêmement important dans le sentiment de sécurité, et il existe des aménagements cyclables différents selon le mouvement à travers une intersection. Pour ajouter les infrastructures cyclables possibles, il a été nécessaire de créer une table des différents mouvements possibles pour les intersections. La Figure 20 présente un exemple simple pour visualiser la situation.

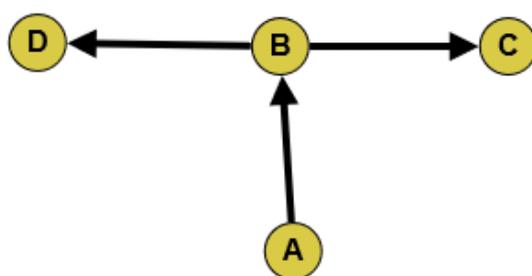


Figure 20: Schéma simplifié d'une intersection sous la forme d'un graphe.

Pour traverser cette intersection et tourner à droite, il faut partir de A, passer par B et finalement se retrouver à C. Pour le mouvement à gauche, A et B ne changent pas, mais on se retrouve finalement à D. Ainsi, le mouvement à travers une intersection est indiqué par 3 nœuds et 2 liens qui seront référencés pour la suite comme :

- *Adjacent node from (anf)* : le nœud adjacent de départ, celui par lequel on entre dans l'intersection (A dans l'exemple)
- *Intersection node (in)* : le nœud de l'intersection (B dans l'exemple)
- *Adjacent node to (ant)* : le nœud adjacent de sortie, celui par lequel on sort de l'intersection (C (droite) ou D (gauche))
- *Anf_in* : le lien qui va du *anf* au *in*
- *In_ant* : le lien qui va du *in* au *ant*

Sur cette base, la table des mouvements a été créée selon la marche à suivre :

- a) Déterminer les nœuds qui sont des intersections
 - i. Prendre les nœuds possédant un attribut *highway* parmi *traffic signals/crossing/mini roundabout*
 - ii. Pour les autres nœuds, enlever les nœuds avec un degré qui vaut 1, 2 ou 4 (représentent des nœuds interstitiels)
- b) Déterminer les nœuds adjacents pour chaque nœud d'intersection et déterminer les permutations possibles qui reflètent les différents mouvements
- c) Vérifier que les mouvements définis en b) sont possibles
 - i. Tenir compte des liens OSM à sens unique
 - ii. Vérifier que les liens existent dans la liste de liens OSM

- d) Calculer les valeurs de trafic moyennes entre les deux liens du mouvement
- e) Déterminer l'angle entre les 3 nœuds de chaque mouvement
- f) Définir si le mouvement est tourner à gauche, à droite ou aller tout droit en fonction de l'angle
 - i. De 0 à 165° : tourner à droite
 - ii. De 165° à 195° : tout droit
 - iii. De 195° à 360° : tourner à gauche

Par la suite, les infrastructures et les conditions dangereuses nécessaires pour l'évaluation de la qualité cyclable ont été ajoutées manuellement à cette table sur QGIS. Les informations ajoutées, différentes pour chaque mouvement, sont codées sous la forme de présence/absence avec quelques particularités (qui sont précisées si c'est le cas):

- Présence d'un tourner à gauche indirect
- Présence d'un sas vélo
 - *Easy* : facilement accessible
 - *Yes* : sans accès facilité
- Présence d'une pré-selection pour les cycles
 - *Easy* : facilement accessible
 - *Yes* : sans accès facilité
- Tourner à droite au feu rouge
- Pré-sélection pour tourner à droite pour le TIM
 - *BC_rouge* : présence d'une bande cyclable rouge au sol comme avertissement pour le trafic motorisé de faire attention aux cycles
 - *Yes* : aucune indication spéciale

4.4 Application de routing et géovisualisation

L'application a été développée sur un appareil Lenovo ThinkPad T14s (14 pouces) avec un processeur Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU @ 1.80GHz 2.30 GHz et une mémoire RAM installée de 16,0 Go (15,8 Go utilisable). Il est possible que certains rendus visuels soient légèrement différents en fonction de la taille de l'écran et du navigateur web utilisé (Mozilla Firefox pour ce travail).

L'application développée, nommée VéloRouter Lausanne, a pour objectif de proposer un trajet mettant en avant la qualité cyclable à un-e utilisateur-trice. L'application nécessite de pouvoir :

- Déterminer le point de départ et le point de destination
- Calculer un itinéraire entre ces deux points
- Mettre à disposition des informations sur le trajet proposé
- Personnaliser certains paramètres concernant la qualité cyclable

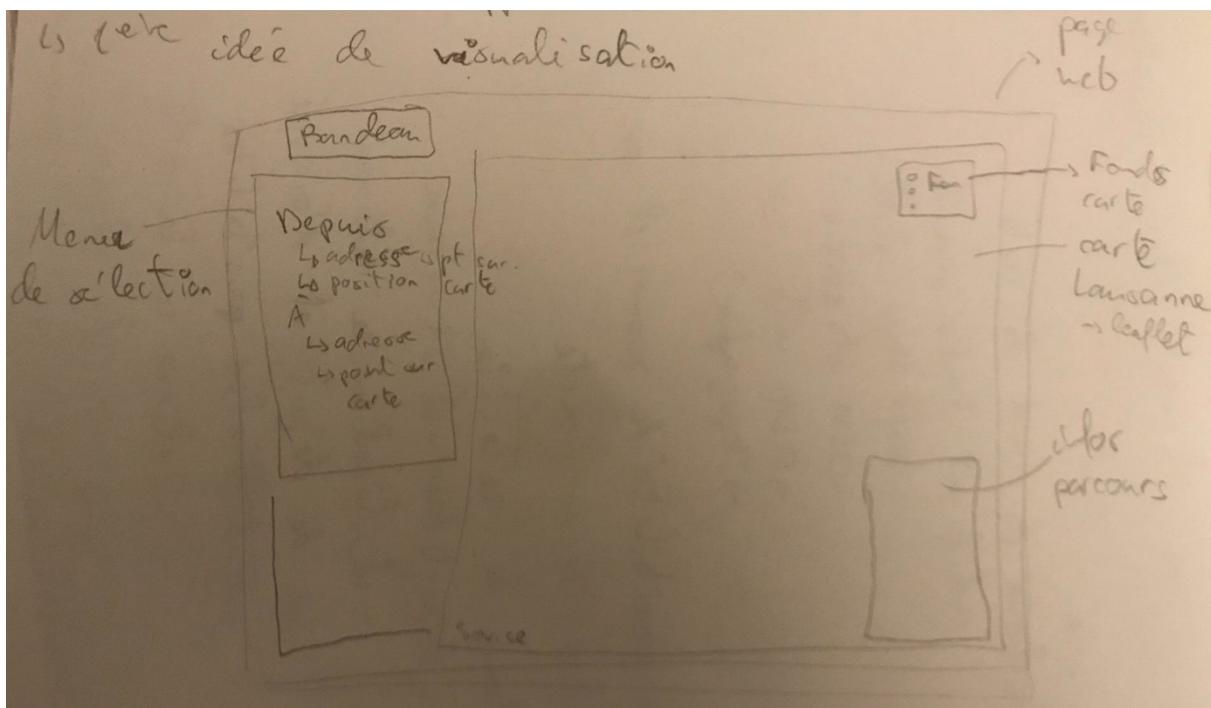


Figure 21: Premier schéma du design visuel de l'application.

La Figure 21 présente la première ébauche de visualisation de l'application. Elle contient les différentes fonctionnalités discutées ci-dessus. C'est ce premier design qui a été suivi pour développer l'application. Le développement visuel et l'interactivité de l'application s'est fait de manière exploratoire et itérative en ajoutant les fonctionnalités au fur et à mesure tout en essayant de mettre en place une utilisation la plus intuitive et simple possible pour les utilisateur-ice-s. L'application ne représente de loin pas la 1^{ère} étape de ce travail puisqu'elle se base sur l'évaluation de la qualité cyclable. Par conséquent, le temps à disposition pour développer l'application fut restreint et l'objectif est d'obtenir une application fonctionnel pour démontrer son fonctionnement et sa structure possibles.

La page web est la partie visible par les utilisateur·ice·s. Elle repose sur une partie serveur qui construit la page et réagit aux choix de l'utilisateur·ice. Le côté serveur contient une partie statique pour définir la page affichée : la structure est déterminée par un fichier HTML, le style par un fichier CSS alors que l'interactivité est gérée par un fichier Javascript. L'application utilise aussi le *framework* Flask qui est utilisé pour charger les données en ligne depuis le repo GitHub et de définir la structure de la page web en allant récupérer les URL des différents fichiers HTML, CSS et Javascript. La partie Flask de l'application est aussi utilisée pour récupérer les choix de l'utilisateur·ice rendus possibles avec le fichier Javascript pour lancer l'algorithme de routing et envoyer le trajet trouvé pour mettre à jour la page web. Le schéma simplifié de la structure de l'application est visible dans la Figure 22 ci-dessous.

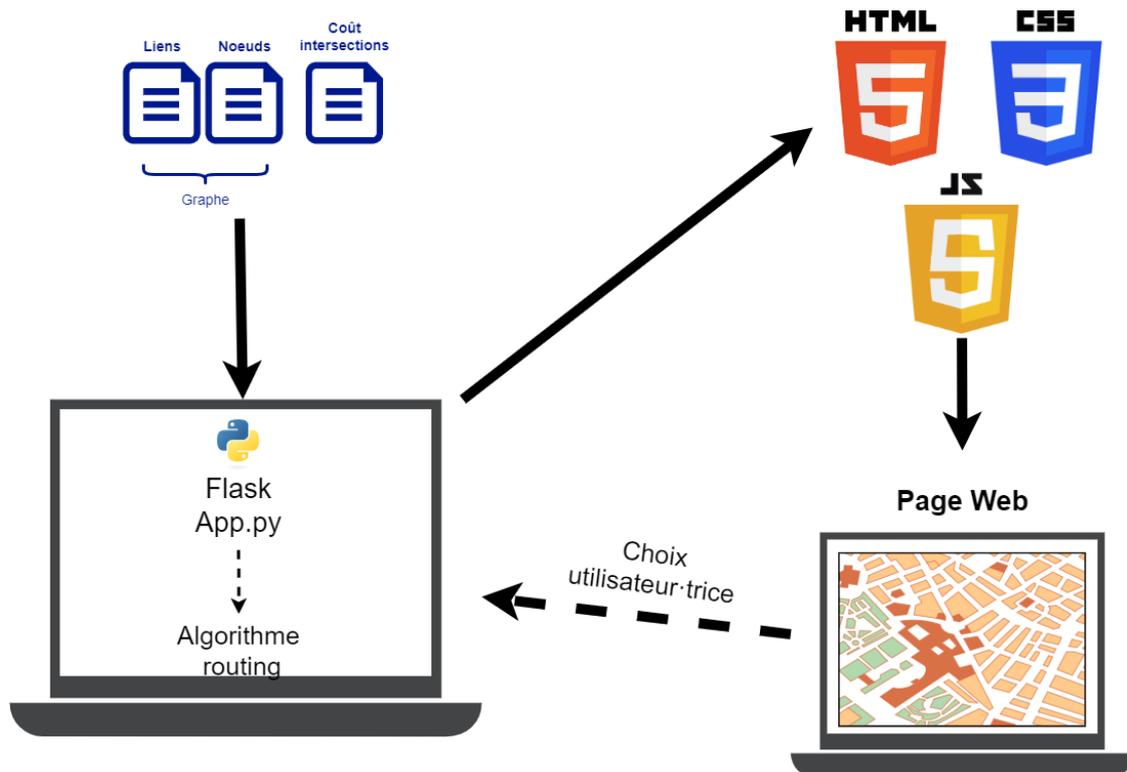


Figure 22: Schéma de visualisation de la structure de l'application web based.

5. Résultats et discussion

Dans cette partie, les résultats du cadre opératoire sont présentés et discutés. Cette partie commence par s'intéresser à la qualité cyclable des intersections avant de se focaliser sur la qualité cyclable des liens. L'analyse de cette dernière permet d'intégrer les interactions possibles entre les rues et les intersections. Pour finir, le fonctionnement de l'application est présenté.

5.1 Qualité cyclable des intersections

5.1.1 Intersections avec signalisation lumineuse

Le nombre total de mouvements pour les intersections avec feux de signalisation est de 762. En prenant en compte tous les mouvements, la répartition des coûts associés à ces mouvements possède deux modes principaux et quelques modes mineurs visibles sur l'histogramme de la Figure 23. Le mode le plus grand se situe entre 100 et 110 mètres ; il est en fait uniquement composé de valeurs de 101 mètres. Cette valeur correspond à l'addition du coût de base de 67 mètres pour une intersection et du coût de 34 mètres spécifique pour les intersections avec signalisation. Ainsi, environ 40 % des coûts possèdent un coût multiplicateur de 1 ; il n'y a pas de configuration dangereuse qui péjore la sécurité et le confort des cyclistes, ni d'aménagements pour les améliorer. Le deuxième mode concerne des valeurs se trouvant entre 150 et 160 mètres qui sont présentes pour environ 30 % des mouvements aux intersections avec signalisation. On constate un mode bien plus faible pour la classe entre 120 et 130 mètres qui compte pour 10 % des mouvements. Ces valeurs sont le fruit de situations mixtes entre certaines configurations dangereuses du carrefour et certains aménagements cyclables mis en place pour améliorer la sécurité. Enfin, les coûts se trouvant dans les classes en dessous de 100 mètres peuvent être considérés comme positifs concernant la qualité cyclable. En effet, ils reflètent la mise en place d'infrastructures cyclables pour améliorer la sécurité et le confort des cyclistes. Ces mouvements comptent pour environ 15 % des mouvements aux intersections avec signalisation lumineuse.

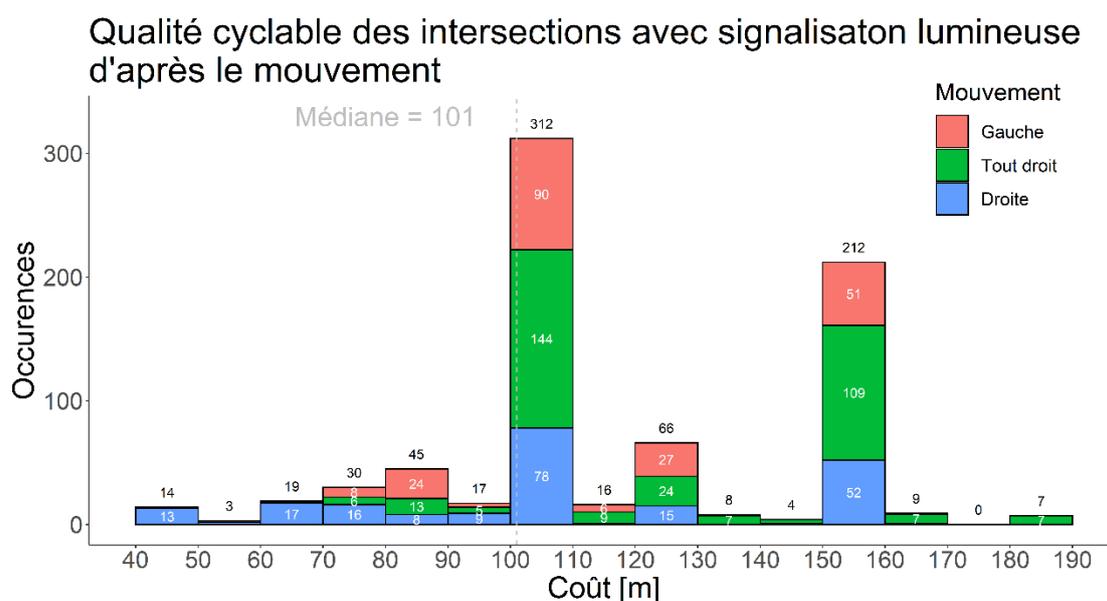


Figure 23: Histogramme de la qualité cyclable des intersections avec signalisation selon le mouvement à travers l'intersection.

En s'intéressant à la répartition des coûts selon les mouvements, représentés par les 3 couleurs sur l'histogramme, on remarque que c'est le mouvement « Droite » qui possède les valeurs les plus basses. Pour des coûts en dessous de 80 mètres, c'est ce mouvement qui est presque exclusivement présent. Néanmoins, ce mouvement possède aussi des coûts élevés, avec une répartition assez proche du mouvement « Gauche ». De manière surprenante, c'est le mouvement « tout droit » qui possède les coûts maximums et qui possède le plus grand nombre de coûts supérieurs avec près de 50 % des valeurs supérieures à la médiane. Le mouvement « Gauche » possède aussi une part non-négligeable de coût au-dessus de la médiane avec environ 40 %.

Les trois boxplot de la Figure 24 permettent de mieux visualiser la répartition des valeurs de coût pour les trois mouvements. Pour le mouvement « Gauche », on remarque que la répartition des coûts est concentrée entre 101 et 125 m ; le boxplot est très « écrasé », l'écart d'environ 20 mètres entre le 1^{er} quartile, égal à la médiane, et le 3^{ème} quartile, est faible. De plus, la valeur minimum, légèrement supérieure à 60 mètres, est bien plus élevée que pour les deux autres mouvements qui voient leur valeur minimum descendre juste au-dessus de 40 mètres. Pour le mouvement « Droite », le boxplot est bien plus allongé et révèle un phénomène très différent. L'écart entre le 1^{er} quartile et la médiane est très faible ; énormément de valeurs se trouvent proches de 101 mètres. Au contraire, les valeurs élevées sont bien plus éloignées de la médiane puisque la valeur du 3^{ème} quartile est d'environ 140 mètres. Les valeurs au-dessus de la médiane sont donc plus éloignées de celle-ci, c'est-à-dire plus grandes, alors qu'il existe un cluster de valeurs inférieures à la médiane. Pour le mouvement « Tout droit », on est dans une situation qui mélange les deux phénomènes. Comme pour « tourner à gauche », la médiane et le 1^{er} quartile sont très proches ; il y a donc une forte répartition de valeurs juste au-dessous de la médiane. Alors que les valeurs au-dessus de la médiane sont bien supérieures à la médiane et la répartition est plus étirée, l'écart entre la médiane et le 3^{ème} quartile est presque de 50 mètres.

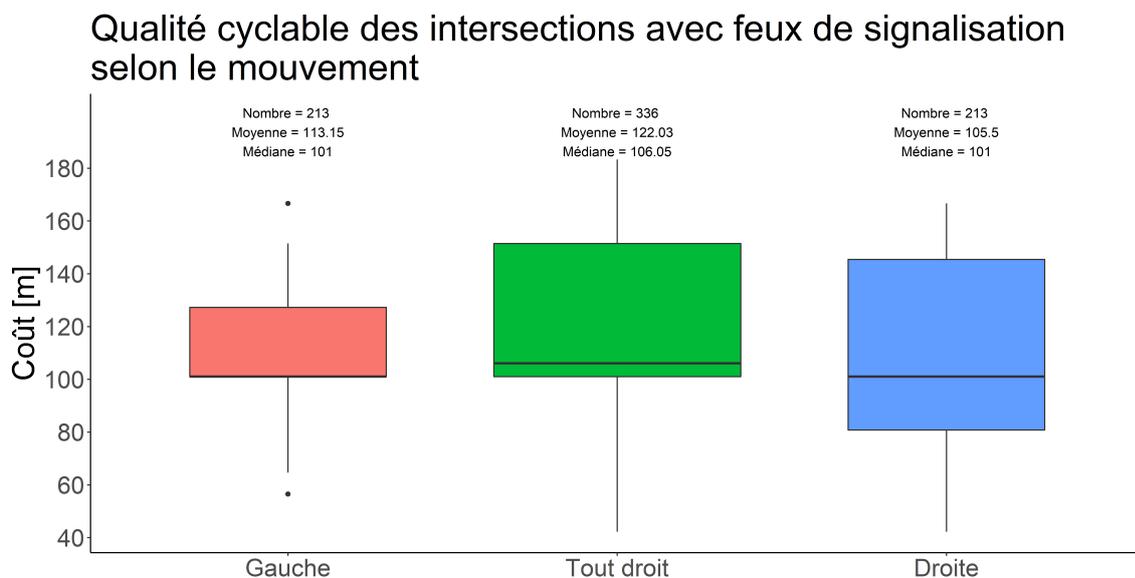


Figure 24: Boxplots de la qualité cyclable des intersections avec feux de signalisation pour les trois mouvements droite, gauche et tout droit.

La Figure 25 permet d’observer la répartition des infrastructures cyclables pour tout mouvement confondu alors que la Figure 26 démontre la répartition des sas vélo et de l’absence d’infrastructures en fonction des mouvements. Ces deux figures permettent d’avancer des explications quant à la répartition des valeurs de l’histogramme de la Figure 23.

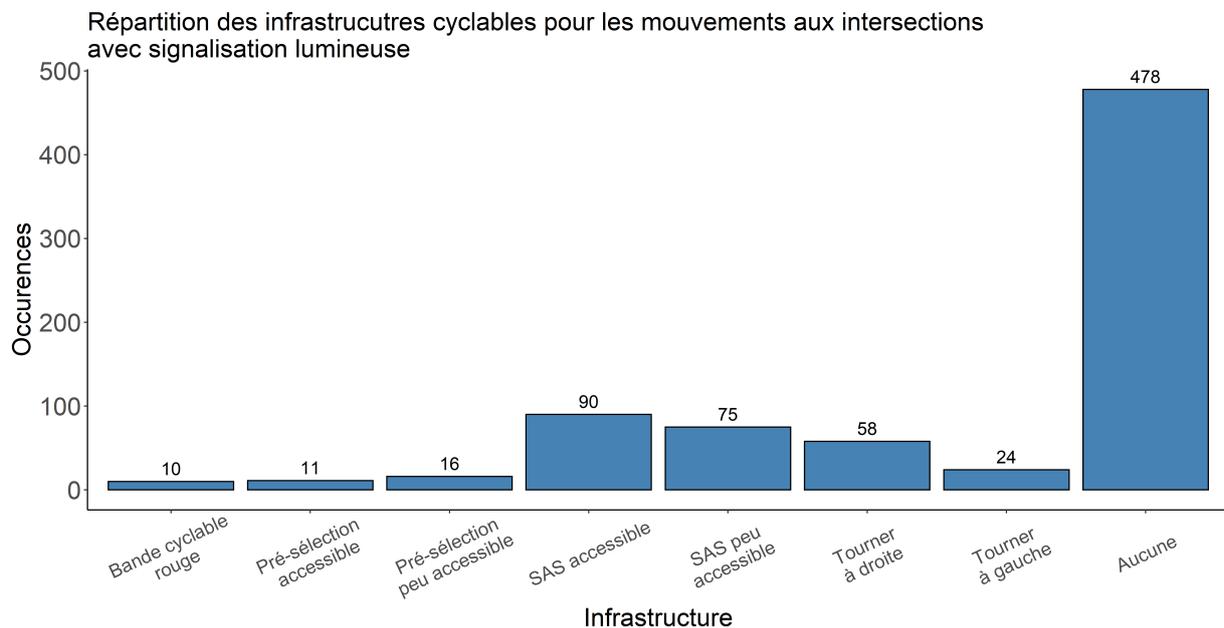


Figure 25: Barplot de la répartition des infrastructures cyclables aux intersections avec feux de signalisation.

Pour la répartition des aménagements cyclables, une large majorité des mouvements ne possède aucun aménagement cyclable. Ceci peut se révéler problématique, surtout en présence de caractéristiques dangereuses du carrefour. C’est par exemple le cas pour les coûts de la classe 150 à 160 mètres de l’histogramme de la Figure 23 qui représentent près de 30 % des mouvements pour ce type d’intersection et obtiennent un coût de 151.5 mètres. Cette valeur est le résultat de la présence de plusieurs voies de circulation et d’une absence d’aménagement cyclable (101 mètres multipliés par 1.5). Un élément positif concerne la forte présence de sas vélo qui sont présents 165 fois, soit environ 20 % des mouvements. Malheureusement, près de la moitié de ces sas vélo sont difficilement accessibles, ce qui leur fait perdre une partie de leur effet positif. Finalement, on constate une émergence assez rapide des aménagements pour tourner à droite au feu rouge ; cette possibilité est offerte par la loi suisse depuis le 1^{er} janvier 2021 et il y a déjà 58 aménagements de ce type, soit environ 25 % des mouvements « Droite » aux intersections avec feux. L’aménagement pour tourner à gauche indirectement fait aussi progressivement son apparition ; il est présent 24 fois, ce qui compte pour environ 10 % des mouvements, sachant que cet aménagement est plus contraignant à mettre en place. La Figure 26 permet d’avancer des hypothèses concernant la répartition des coûts expliquée plus haut. Le mouvement « tout droit » se retrouve sans aménagement dans près de 70 % des cas ; c’est sûrement à cause de cela que ce mouvement se retrouve avec les coûts les plus élevés. De plus, même si environ 20 % de ce mouvement possède un sas vélo, ce dernier est facilement accessible moins d’une fois sur deux. L’absence de sas vélo ou un sas vélo difficilement accessible entraîne une sécurité et un confort lacunaires, puisque ceci oblige un-e cycliste à soit slalomer pour remonter la file de voiture, soit rester au milieu du trafic. Ce phénomène est de plus amplifié lorsque le nombre de voies

de circulation du trafic motorisé est supérieur ou égal à 2. Pour les mouvements « Gauche » et « Droite », c'est près de 50 % des mouvements qui se retrouvent sans aménagement. Cette situation peut se révéler plus problématique au niveau de la sécurité pour le mouvement « Gauche » puisqu'il nécessite dans la majeure partie des cas de devoir traverser au minimum une voie de circulation.

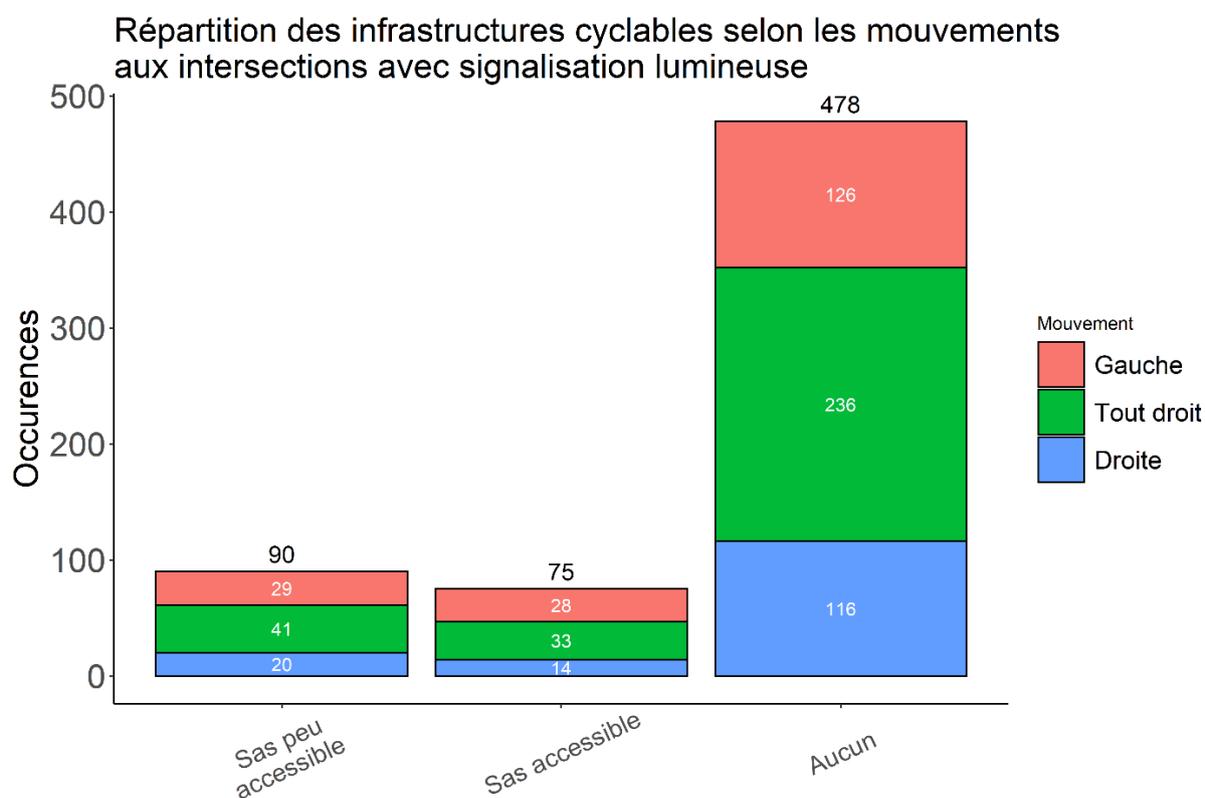


Figure 26: Barplot de la répartition (et l'absence) des sas vélo aux carrefours avec feux de signalisation pour les 3 mouvements gauche, droite et tout droit.

5.1.2 Intersection sans signalisation lumineuse

La Figure 27 présente la distribution des valeurs de qualité cyclable des intersections sans signalisation avec la répartition selon les mouvements. En prenant en compte les 3 mouvements, on remarque deux modes principaux à 0 et 67 mètres. Pour le mode à 0 mètre, il s'agit des traversées de carrefour qui se passent dans des quartiers et des rues résidentiels pour lesquels le coût des intersections été considéré comme nul au vu de la basse vitesse et du faible trafic dans ces secteurs. Le deuxième mode à 67 mètres matérialise les sas intersections qui reçoivent uniquement le coût basique d'une intersection ; il n'y a donc pas d'influence négative d'un trafic élevé et/ou d'une vitesse élevée. Le premier mode constitue environ 37 % des mouvements alors que le deuxième mode représente 40 % des mouvements. Par conséquent, une grande majorité des intersections sans signalisation lumineuse, ne pose pas de problème particulier pour la sécurité. Néanmoins, les 20 % de mouvements restants désignent environ un millier de mouvements pouvant poser un problème au niveau de la sécurité des cyclistes. Il y a 3 petits modes pour des qualités cyclables négatives à 100, 130 et 190 mètres. Pour les valeurs au-dessus de 67 mètres, on remarque que ce sont en grande partie les mouvements « tout

droit » et « Gauche » qui sont présents. Le premier mode est le résultat du coût basique multiplié par le coût associé au nombre de voies de circulation égal ou supérieur à 2. Il existe donc plusieurs voies de circulation pour le trafic motorisé, ce qui diminue le sentiment de sécurité général des cyclistes quel que soit le mouvement. Le deuxième mode, qui contient des valeurs de 133 mètres, correspond à une charge de trafic entre 5'000 et 10'000 véhicules, ce qui entraîne un sentiment de sécurité amoindri pour les mouvements « Gauche » et « Tout droit ». Le mode suivant, entre 190 et 200 mètres, correspond à la même situation au niveau de la charge de trafic, à laquelle s'ajoute un nombre de voies supérieur ou égal à 2. Les quelques valeurs au-dessus de ce 3^{ème} mode vont être le résultat d'une charge de trafic plus élevée, entre 10'000 et 20'000 véhicules, avec la possible influence négative du nombre de voies.

Qualité cyclable des intersections sans signalisation lumineuse selon le mouvement

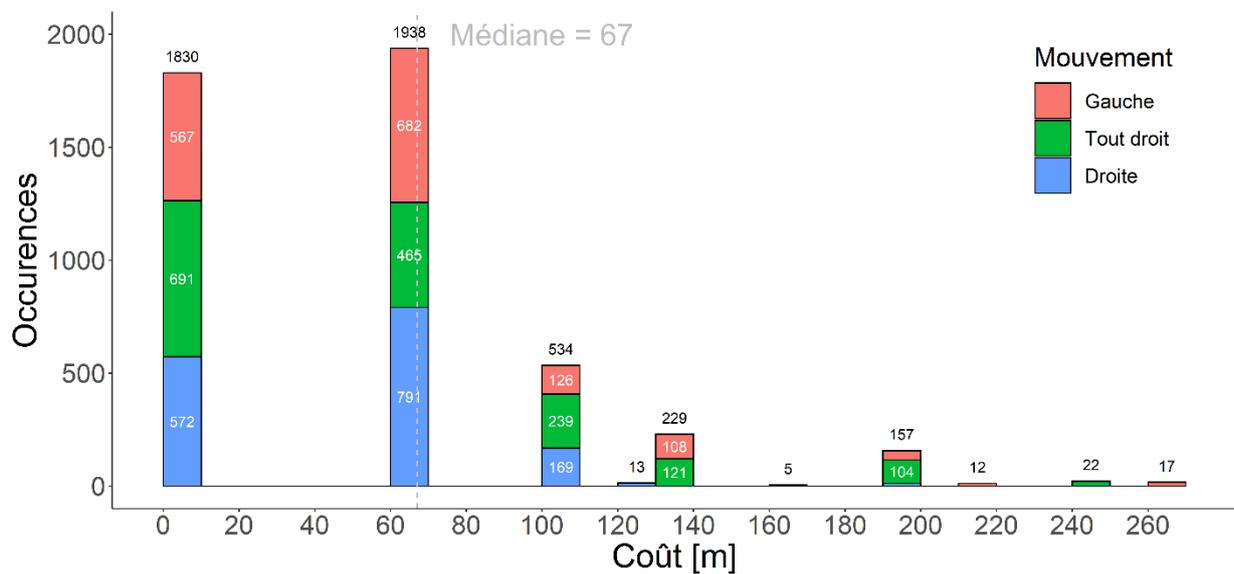


Figure 27: Histogramme de la qualité cyclable des intersections sans feux de signalisation d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).

5.1.3 Petits giratoires

Le nombre de mouvements total pour les petits giratoires est bien moins grand puisqu'il y a seulement 90 mouvements. La distribution des coûts associée est visible dans l'histogramme de la Figure 28. La distribution pour tous les mouvements est assez éparpillée avec 3 modes qui ressortent. Le mode le plus important est pour la classe de 110 à 120 mètres qui possède les valeurs les plus élevées et représente 30 % des mouvements des petits giratoires.

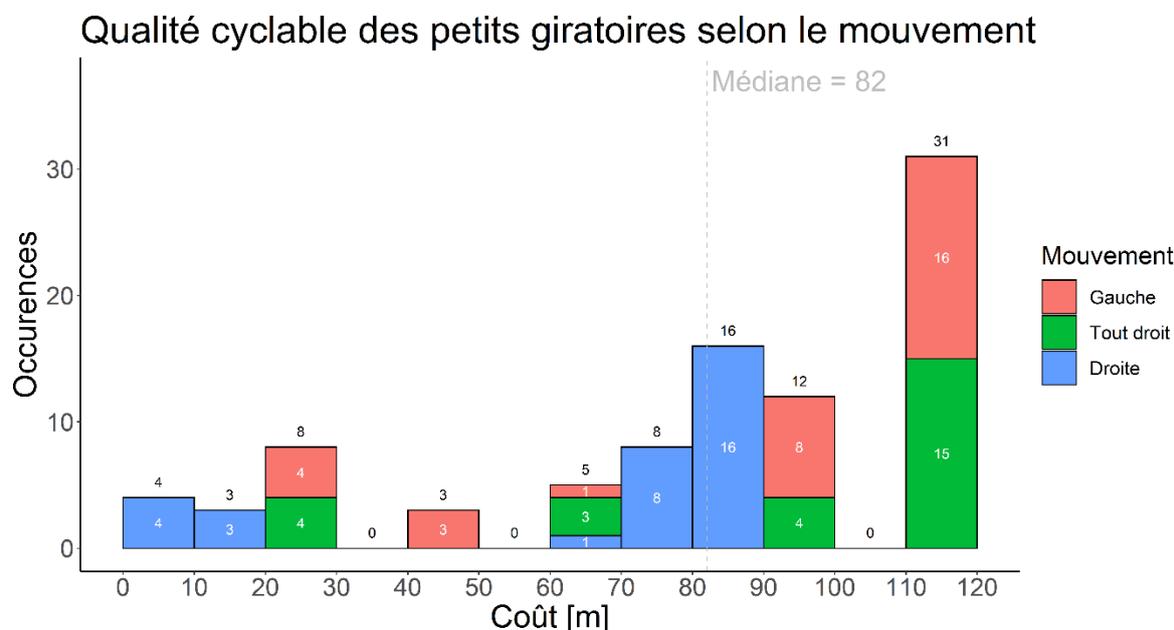


Figure 28: Histogramme de la qualité cyclable des petits giratoires d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).

Deux autres modes plus petits sont visibles : pour les classes de 80 à 90 mètres et de 90 à 100 mètres, qui ensemble représentent 30 % des mouvements. Pour les petits giratoires, il y a donc un nombre assez élevé de mouvements avec une qualité cyclable spécialement défailante, c'est-à-dire au-dessus du coût basique de 67 mètres pour une intersection. En effet, seulement 30 % des valeurs se retrouvent au-dessous de ce coût. Néanmoins, on constate que ces valeurs sont plus éparpillées avec une majeure partie des valeurs comprises entre 0 et 30 mètres. Le coût minimal obtenu est de 10 mètres ; ceci s'explique par des giratoires qui se trouvent dans des quartiers résidentiels avec une limite de vitesse à 30 km/h et une charge de trafic au-dessous de 10'000 véhicules/jour. Pour les valeurs comprises entre 10 et 50 mètres, ces coûts reflètent soit une augmentation de la charge de trafic pour dépasser les 10'000 véhicules/jour, soit une augmentation de la vitesse à 50 km/h. Pour la répartition selon les mouvements, comme attendu, ce sont les mouvements « Gauche » et « tout droit » qui obtiennent les valeurs les plus élevées étant donné que ce sont les mouvements qui demandent de traverser une plus grande distance dans le giratoire.

5.1.4 Grands giratoires

La Figure 29 contient l'histogramme des coûts associés à la qualité cyclable des grands giratoires. On dénote de manière générale que la distribution des coûts suit une courbe gaussienne. Les valeurs sont réparties de manière assez équilibrées autour de la valeur de la médiane dans les classes allant de 70 à 160 mètres avec quelques valeurs extrêmes supérieures pouvant atteindre 200 mètres.

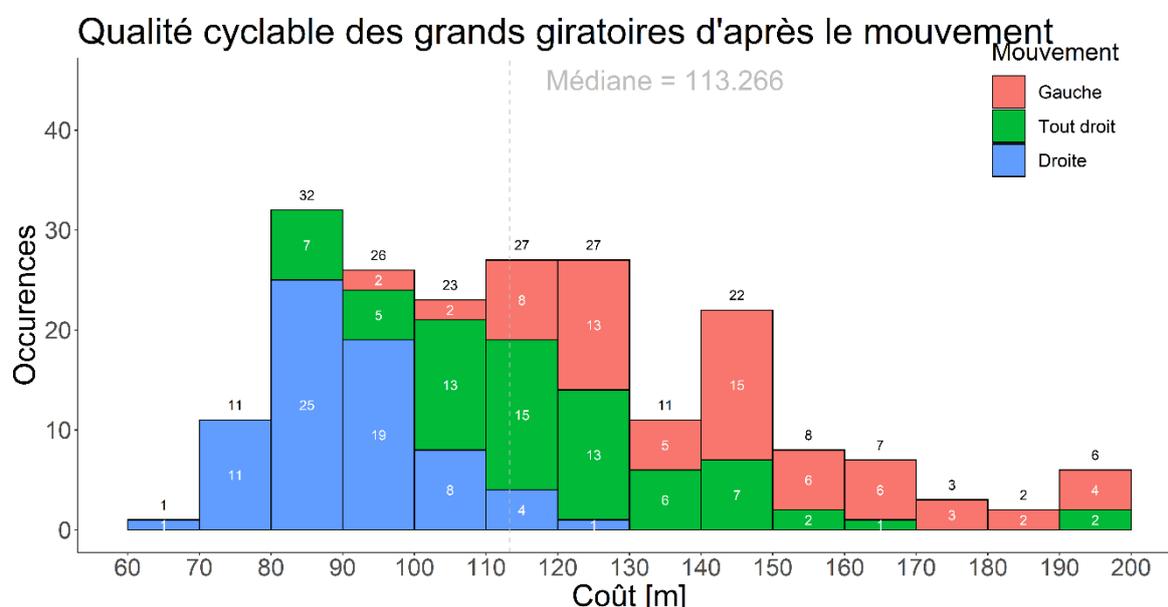


Figure 29: Histogramme de la qualité cyclable des grands giratoires d'après le mouvement à travers le carrefour (gauche, droite et tout droit).

La répartition pour les différents mouvements dénote une grande différence entre le « Droite » et les deux autres mouvements « Gauche » et « tout droit ». Le premier reçoit les coûts les moins élevés ; il ne dépasse pas les 110 mètres, ce qui est très proche de la valeur de la médiane. De plus, le boxplot de la Figure 30 permet d'observer la proximité de la médiane et du 1^{er} quartile, ce qui démontre qu'une grande partie des valeurs sont rapprochées et plutôt basses étant donné que le minimum pour les grands giratoires est de 69.08. L'écart entre la médiane et le 3^{ème} quartile est légèrement plus étiré ; ainsi, les valeurs au-dessus de la médiane prennent des valeurs plus « extrêmes » et étirent la moyenne vers le haut. Les mouvements « Tout droit » et « Gauche » reçoivent eux des coûts bien plus élevés ; leurs valeurs se retrouvent en grande majorité au-dessus de la médiane.

La Figure 30 présente la distribution des valeurs pour chaque mouvement. On remarque que c'est le mouvement « Gauche » qui se voit attribuer les coûts les plus élevés ; son 1^{er} quartile est plus élevé que les valeurs pour le mouvement « Droite ». De manière un peu inattendue, on remarque que le mouvement « Tout droit » possède aussi des coûts très élevés et assez proches du mouvement « Gauche ». Des valeurs extrêmes sont notamment proches des 200 mètres. Ces coûts élevés pour le « Tout droit » viennent du fait que pour les grands giratoires, ce mouvement peut également entraîner une longue distance à parcourir dans des conditions de sécurité lacunaires. Les coûts élevés pour le « Tout droit » sont la conséquence de certains grands giratoires dont la configuration est loin d'être cyclo-conforme.

Qualité cyclable des grands giratoires selon le mouvement

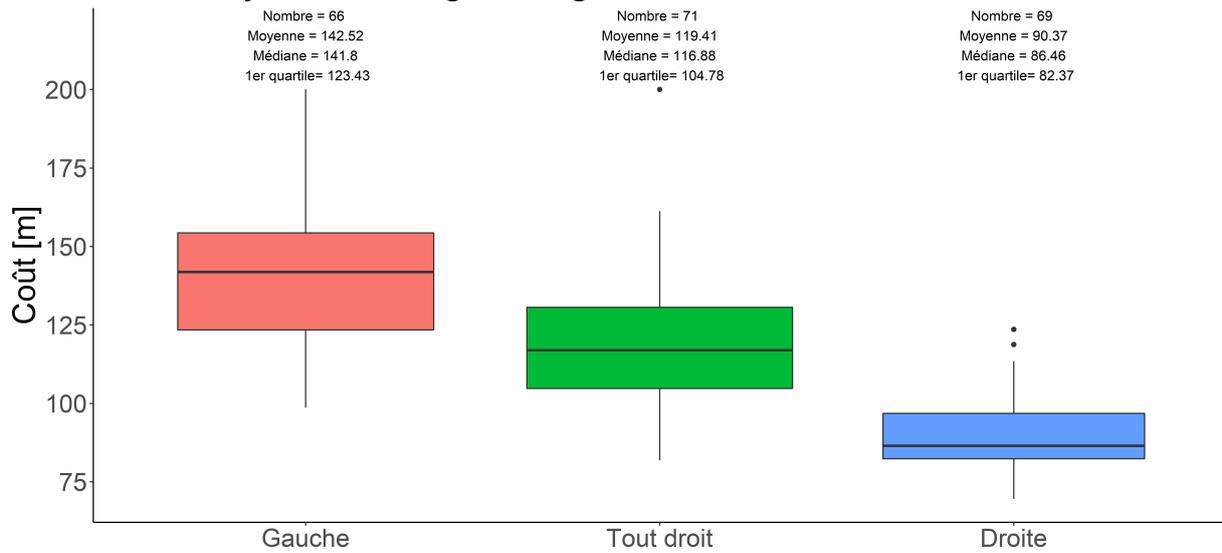


Figure 30: Boxplot de la qualité cyclable des grands giratoires pour les 3 mouvements à travers l'intersection (droite, gauche et tout droit).

La Figure 31 met en avant les 10 giratoires avec les médianes les plus élevées. Les coûts associés sont élevés étant donné que la valeur minimale de la médiane est de 103 mètres et la plus grande atteint quasiment 130 mètres. Trois giratoires possèdent un grand nombre de mouvements possibles : celui sur l'Avenue Edouard-Dapples, celui sur l'Avenue du Mont d'Or et celui sur l'Avenue de Montchoisi. Les deux premiers possèdent 5 ou 6 branches alors que le giratoire de Montchoisi est très particulier ; il s'agit en fait de deux giratoires connectés formant un grand giratoire avec à nouveau de nombreuses branches. De plus, on note que l'Avenue de Rhodanie possède quant à elle deux giratoires avec une mauvaise qualité cyclable ; ainsi un-e cycliste utilisant cette avenue pourrait rencontrer un grand stress avec deux giratoires à traverser. Deux autres giratoires sont assez proches spatialement : celui de la Place de la Gare et celui sur l'Avenue Edouard-Dapples qui se situe juste en dessous de la gare de Lausanne. À nouveau, suivant le trajet emprunté par un-e cycliste, il est possible d'être obligé de traverser ces deux giratoires, ce qui peut être source de grand stress.

10 giratoires avec la plus mauvaise qualité cyclable

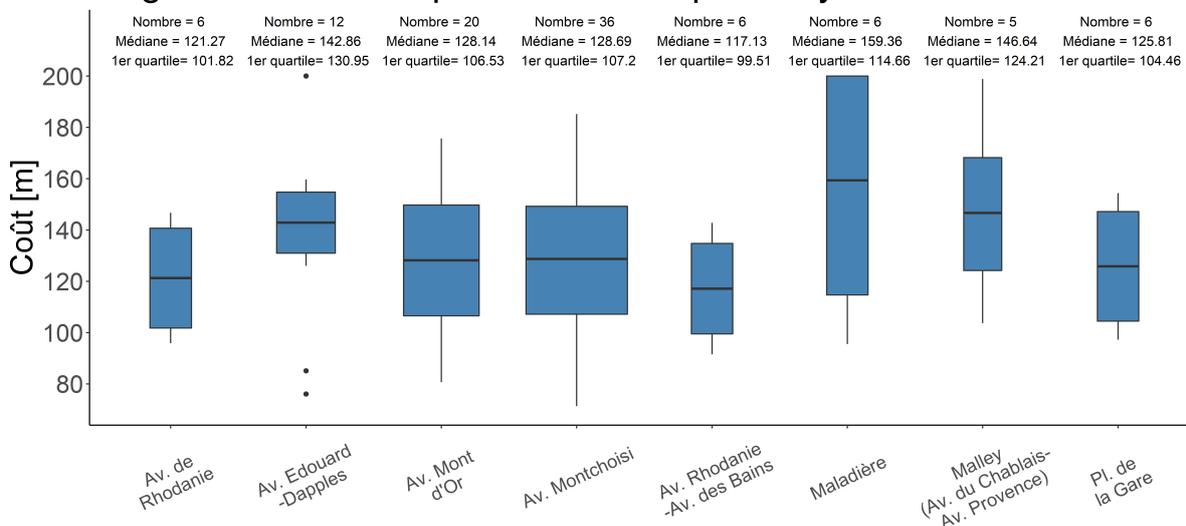


Figure 31: Boxplots de la qualité cyclable pour les 10 grands giratoires les plus problématiques.

L'interaction de ces giratoires avec la qualité cyclable des liens est un élément fondamental qui sera abordé lors de l'analyse de la qualité cyclable. Les giratoires peuvent soit venir renforcer une sécurité lacunaire présente sur une rue, soit venir péjorer la bonne qualité cyclable d'une rue et représenter un maillon faible.

5.2 Qualité cyclable des liens

Dans cette partie, les résultats de la qualité cyclable des liens sont présentés. Tout d'abord, chaque élément composant la qualité cyclable est analysé séparément, avant de présenter la qualité cyclable dans son ensemble et d'évoquer certaines dynamiques possibles entre les rues et les intersections. Le support d'analyse utilisé pour cette partie est la carte ; au moins une carte est produite pour chacune des composantes. Un élément important quant aux cartes concerne la mise en classe des valeurs ; ce sont souvent des mises en classe personnalisées qui ont été définies. En effet, les mises en classes classiques pouvaient donner des résultats contre-intuitifs par rapport à la méthodologie proposée ; l'exemple le plus frappant est que des liens avec un coût lié à la topographie positif ou négatif proche de 0 se retrouvaient dans une classe similaire. Néanmoins, pour chacun des coûts, la mise en classe de Jenks a été utilisée comme base de travail, puis modifiée si nécessaire pour mieux refléter les différentes situations rencontrées. De plus, ce n'est pas le nombre d'éléments par classe qui est donné, puisque chaque entité ne fait pas la même longueur, mais la somme de la longueur des liens de la classe.

5.2.1 Topographie

Pour la carte du coût associé à la topographie (Figure 32), une tendance générale assez claire se dessine ; les routes traversant la ville de Lausanne sur l'axe est-ouest possèdent les coûts les plus faibles. Dans le même temps, les coûts les plus élevés vont avoir tendance à se situer sur les routes se trouvant sur l'axe nord-sud. Ceci est attendu puisque la ville de Lausanne possède les déclivités les plus fortes sur son axe nord-sud, alors que l'axe est-ouest est plus aplani.

Pour la répartition du coût, environ 25 % des routes possèdent un coût négatif ; ceci implique que pour ces liens, le coût de la pente possède un effet positif. La distance perçue par les cyclistes sera raccourcie par rapport à la distance originelle. On remarque que ce coût négatif possède des valeurs bien plus faibles en valeur absolue que les valeurs de coûts positifs. Pour les valeurs de coûts positifs, ces dernières expriment une perception négative puisque le lien se retrouve allongé. Près de la moitié de la longueur du réseau cyclable possède des valeurs comprises entre 0 et 0.25 qui expriment une perception légèrement négative au niveau de la topographie. Cette perception négative peut être incarnée à la fois par des pentes positives (difficulté d'effort) et des pentes négatives (baisse de la sécurité) ; ici, près de 75 % de la longueur de cette classe est représentée par des déclivités positives. Les deux classes suivantes illustrent des valeurs de coûts qui entraînent une perception très négative ; la distance perçue s'allonge de plus en plus avec une augmentation de 50 % ou 75 % pour les limites des deux classes. Ces classes constituent environ 20 % de la longueur du réseau et sont majoritairement causées par des pentes positives qui représentent 90 % des valeurs rencontrées. La perception négative à cause de l'effort à fournir devient très importante pour ces valeurs de pente. En outre, les liens avec une perception négative due à une pente positive forment de longs tronçons continus au sein du réseau. Il s'agit souvent de tronçons en majeure partie associée à un coût compris entre 0 et 0.25, qui se retrouvent en plus entrecoupés de tronçons plus courts associés à des valeurs de coûts plus élevés. Par conséquent, un trajet à vélo qui passe par ces tronçons peut entraîner une perception globale très négative avec un effort important à fournir sur de longues distances.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Coût associé à la topographie pour un sens de circulation

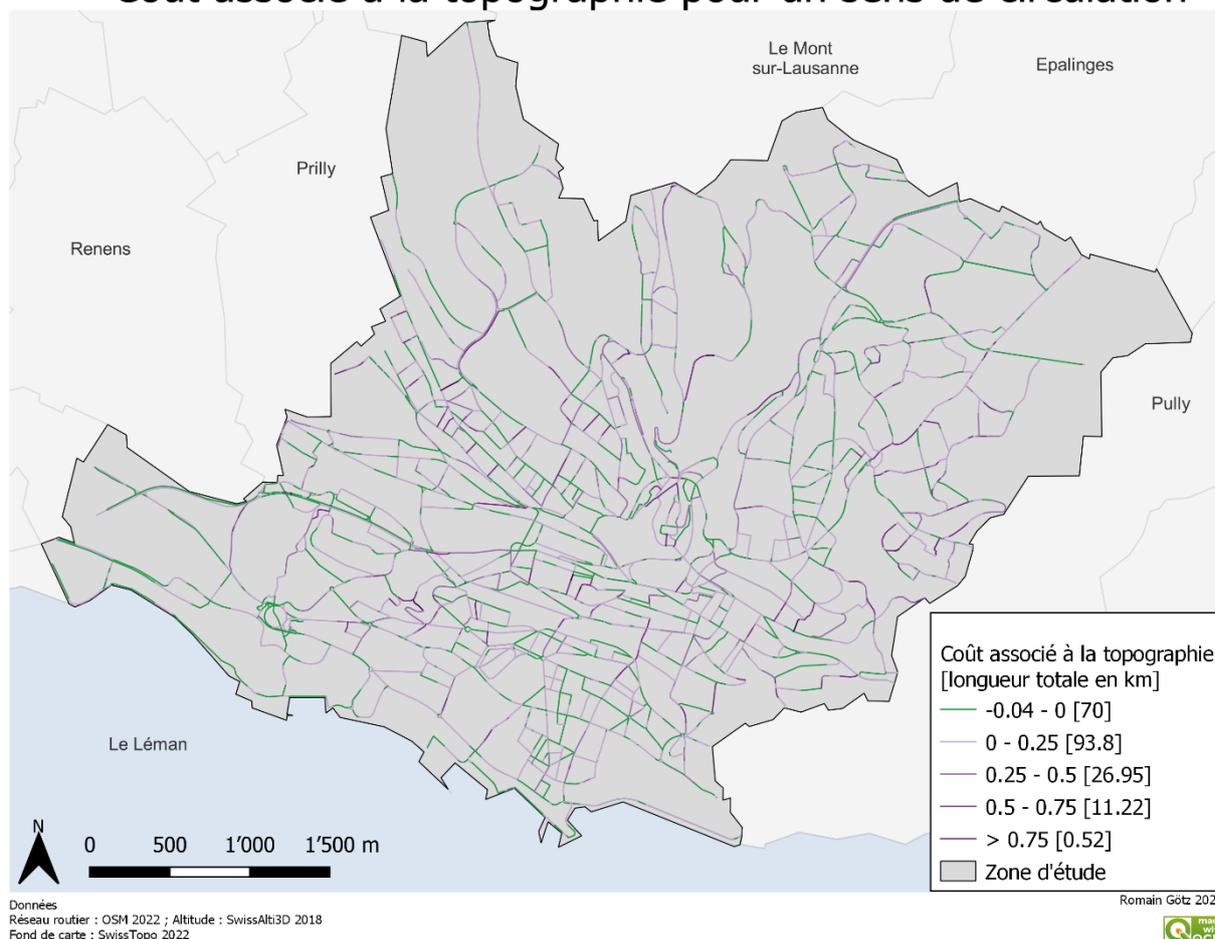


Figure 32: Carte du coût associé à la topographie pour la ville de Lausanne. Mise en classe personnalisée avec 1 classe pour les valeurs négatives qui reflètent un coût positif. Les 4 classes pour les valeurs positives suivent une mise en classe selon la méthode de Jenks. Les valeurs limites des classes ont été très légèrement arrondies pour avoir des valeurs plus simples (0.25 au lieu de 0.23 par exemple).

Finalement, il est important de noter que le coût associé à la topographie diffère en fonction du sens de traversée du lien ; le signe de la pente est alors inversé. La carte de la Figure 32 représente le sens de circulation qui traverse l'axe nord-sud de la ville de Lausanne majoritairement dans le sens de la montée ; il contient ainsi des valeurs de pente très élevées. Pour le sens de circulation inverse, la tendance serait en général inversée par rapport à la Figure 32. Les liens de la classe 0 – 0.25 seraient désormais associées à un coût négatif ; ceci s'explique par une pente négative comprise entre 0 et 6 % qui entraînent une perception positive avec un faible effort à effectuer. En revanche, pour les 3 classes au-dessus, il n'y aura pas de passage d'un coût positif à un coût négatif. En effet, comme ces classes sont associées à des valeurs de pente supérieures à 6 %, elles vont aussi se retrouver associées à un coût positif représenté cette fois-ci par une baisse de sécurité due à la grande vitesse. Néanmoins, ces liens se voient attribuer des valeurs plus faibles en comparaison avec les valeurs de pente positive puisque la perception négative en descente est considérée comme légèrement moins problématique que celle en montée.

5.2.2 Coût associé au trafic de poids lourds

Environ 35% du réseau routier est associé à une présence accrue de poids lourds (au-dessus de 8 %), critère défini comme ayant une perception négative par l'OFROU (OFROU, 2008). La répartition spatiale du trafic de poids lourds suit certains axes routiers depuis les sorties d'autoroutes pour rejoindre le centre-ville de Lausanne (Figure 33).

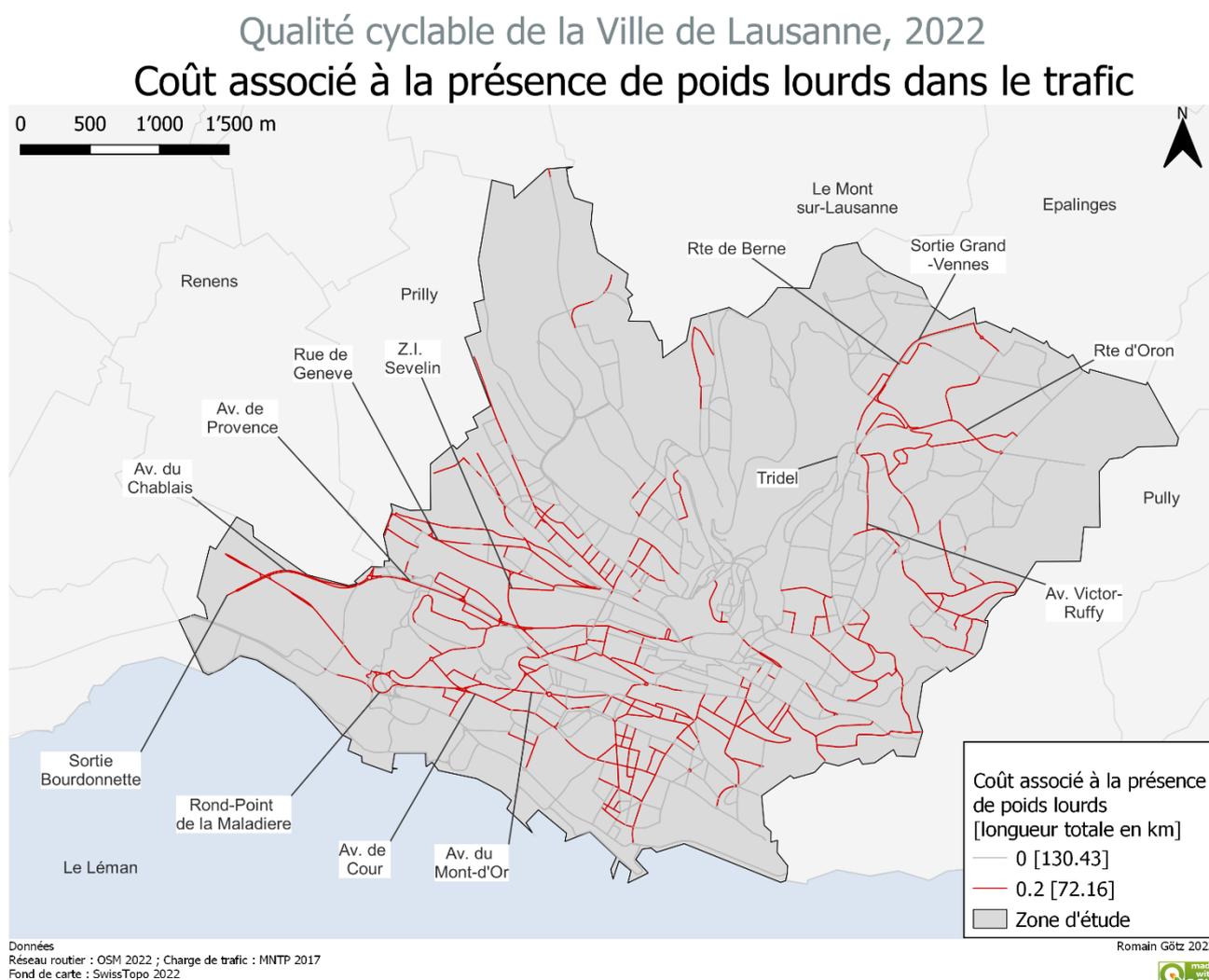


Figure 33: Carte du coût associé au pourcentage de trafic poids lourds. Mise en classe par catégorisation absence-présence.

Il existe un axe clair venant de l'ouest qui entre dans la ville de Lausanne selon différentes possibilités ; l'arrivée à travers la rue de Genève ainsi que la desserte d'autoroute venant de Genève qui comprend les sorties de la Bourdonnette et du rond-Point de la Maladière. La sortie d'autoroute de la Bourdonnette permet de rejoindre le quartier de Malley en suivant l'Avenue du Chablais puis l'Avenue de Provence pour desservir notamment la zone industrielle de Sévelin. La seconde sortie d'autoroute, au rond-point de la Maladière, est aussi rejoint par la route de Chavannes, qui fait le lien avec les communes à l'ouest de Lausanne. Depuis le rond-point de la Maladière, cet axe traverse le quartier de Cour pour rejoindre la quartier Sous-Gare – Ouchy avec une première traversée suivant l'Avenue de Cour, plus au sud, alors que la seconde possibilité suit l'Avenue du Mont d'Or plus au nord. Le quartier Sous - Gare - Ouchy est un quartier densément peuplé et bâti, et est aussi un lieu touristique très visité.

Cette situation demande probablement de nombreuses livraisons pour les hôtels, restaurants, magasins, musées, etc. La dernière possibilité pour cet axe venant de l'ouest est d'arriver directement dans le quartier de Malley à travers la rue de Genève. Ceci permet aussi de rejoindre la zone industrielle de Sévelin ou de desservir en cours de route la zone industrielle de Malley. Finalement, il semble exister un autre axe, moins éparpillé en termes d'espace, au nord-est, qui se situe vers le quartier Sallaz – Vennes. À nouveau, il existe une desserte d'autoroute, Grand-Vennes, ainsi qu'une zone industrielle vers la Sallaz avec notamment l'usine d'incinération de Tridel. Par conséquent, la rue de Berne et une partie de l'Avenue Victor-Rufy et de la route d'Oron possèdent une charge de trafic de poids lourds importante.

5.2.3 Bénéfice zones vertes et étendues d'eau

Pour le bénéfice lié à un environnement accueillant, on remarque que relativement peu de secteurs du réseau routier possèdent un effet bénéfique ; seulement 30 % ont un bénéfice associé, qui est souvent assez faible. La distribution spatiale de ces bénéfices est très clustérisée et suit la présence de parcs, de forêts et du Léman. Toute la partie proche de ce dernier possède un environnement accueillant. Différents parcs de la ville qui permettent une traversée pour les vélos possèdent aussi un environnement agréable ; le Parc de Milan, la Vallée de la Jeunesse, le Parc de Mon-Repos et l'Esplanade de Montbenon. Finalement, la présence de la forêt de Sauvabelin au nord de la ville entraîne aussi quelques routes avec un environnement accueillant.

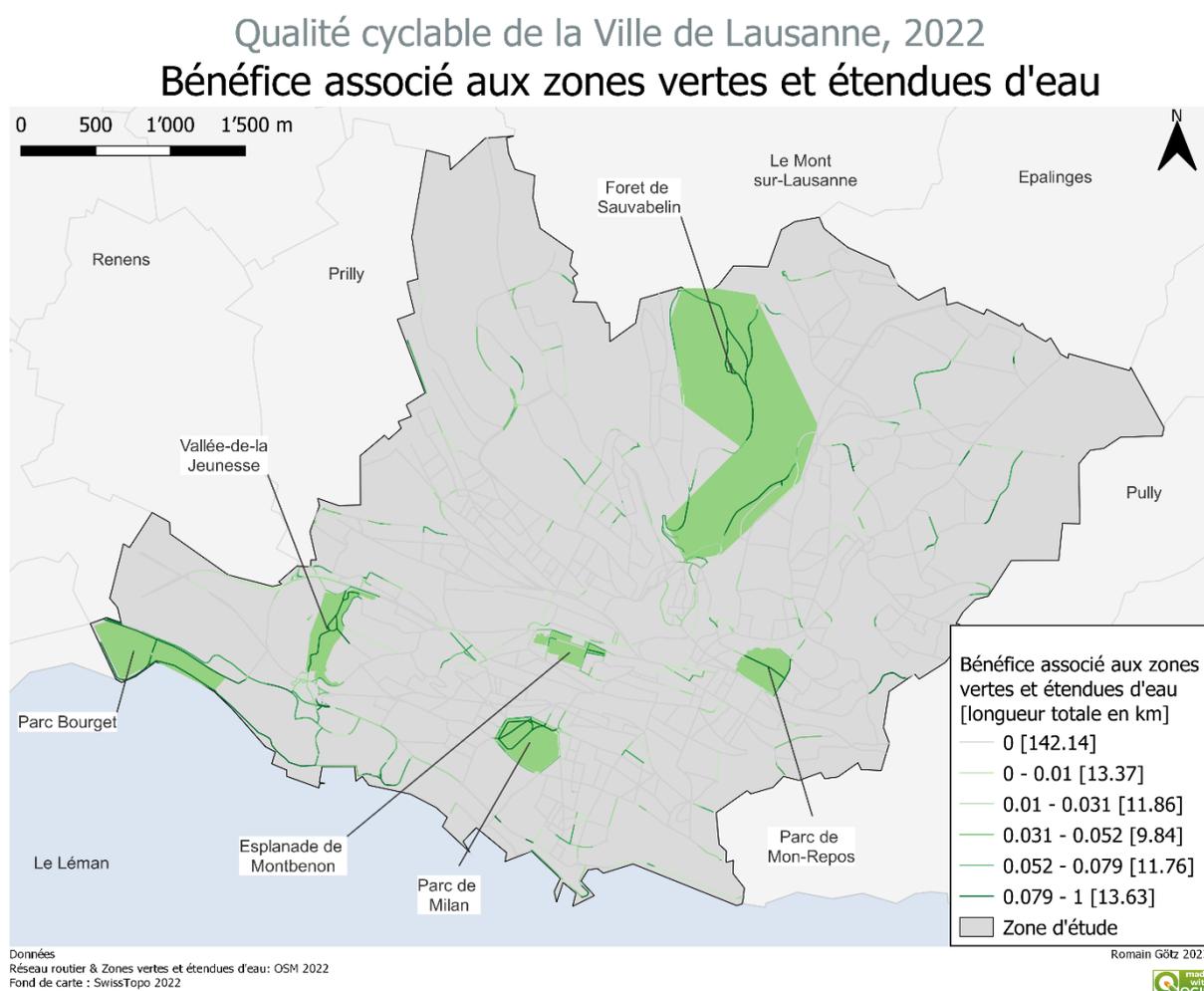


Figure 34: Carte du bénéfice associé à un environnement accueillant par la présence de zones vertes ou d'étendues d'eau. Mise en classe selon Jenks avec mise à l'écart des valeurs nulles.

5.2.4 Coût associé aux infrastructures cyclables, à la vitesse et au trafic

La répartition des aménagements cyclables pour les liens du réseau cyclable est résumée dans le Tableau 9 et exprimée avec la longueur totale cumulée pour chaque aménagement. Un peu plus de 50 % du réseau ne comporte pas d'aménagements cyclables spécifiques. Cette situation peut poser de sérieux problèmes de sécurité et de confort si la charge de trafic et sa vitesse deviennent trop élevés. La bande cyclable est l'aménagement le plus répandu dans la ville de Lausanne. Le problème est qu'une bande cyclable ne permet pas une séparation totale du trafic. Les pistes cyclables sont aussi assez présentes avec près de 30 kilomètres ; ce large chiffre vient de la réattribution de certaines voies de liaison et de certaines traversées de parcs en tant que piste cyclable dans ce travail. Les aménagements de modération du trafic motorisé sont aussi très présents avec 16 kilomètres de zones de rencontre et 23 kilomètres de zone piétonne ouverte aux cycles. Au total, près de 20 % du réseau cyclable met en place un aménagement cyclable qui permet une séparation du trafic motorisé. Les contresens cyclables sont aussi très présents avec 38 kilomètres, soit environ la moitié de la longueur des rues à sens unique de la ville.

Aménagement cyclable	Longueur cumulée [kilomètres]
Bande cyclable	50.7
Contresens	38.5
Piste cyclable	30.6
Voie de bus autorisée aux cycles	9.1
Zones de rencontres	15.9
Zone piétonne ouvertes aux cycles	23
Trottoir autorisé aux cycles	1
Aucun aménagement	198

Tableau 9: Longueur totale des différents aménagements cyclables pour le réseau cyclable de la ville de Lausanne.

Pour le coût associé aux infrastructures cyclables, deux cartes différentes sont réalisées. La Figure 35 contient tous les liens du réseau cyclable et représente le sens de circulation qui traverse majoritairement l'axe nord-sud en montée. La Figure 36 met en évidence trois zones afin de mieux les visualiser comme elles sont analysées assez en détails. Les cartes pour le sens inverse circulation n'ont pas été réalisées. En effet, une majeure partie des liens ne possèdent pas d'aménagements cyclables et se voit attribuer le même coût pour les deux sens de traversée puisque la valeur de charge du trafic ne change pas. En outre, près de la moitié des aménagements cyclables n'est pas influencée par la présence de trafic et reste le même pour les deux sens de traversée ; c'est le cas pour les zones piétonnes, les zones de rencontre et les pistes cyclables, sauf exception.

Pour la répartition des valeurs, 50 % de la longueur du réseau entraîne une perception positive avec un coût inférieur à 1 alors que 10 % possède un coût acceptable compris entre 1 et 1.1 avec une perception très légèrement négative. Ceci laisse environ 40 % du réseau cyclable avec des coûts supérieurs qui entraînent une perception négative en ce qui concerne la sécurité et le confort.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Coût associé aux infrastructures cyclables pour un sens de circulation

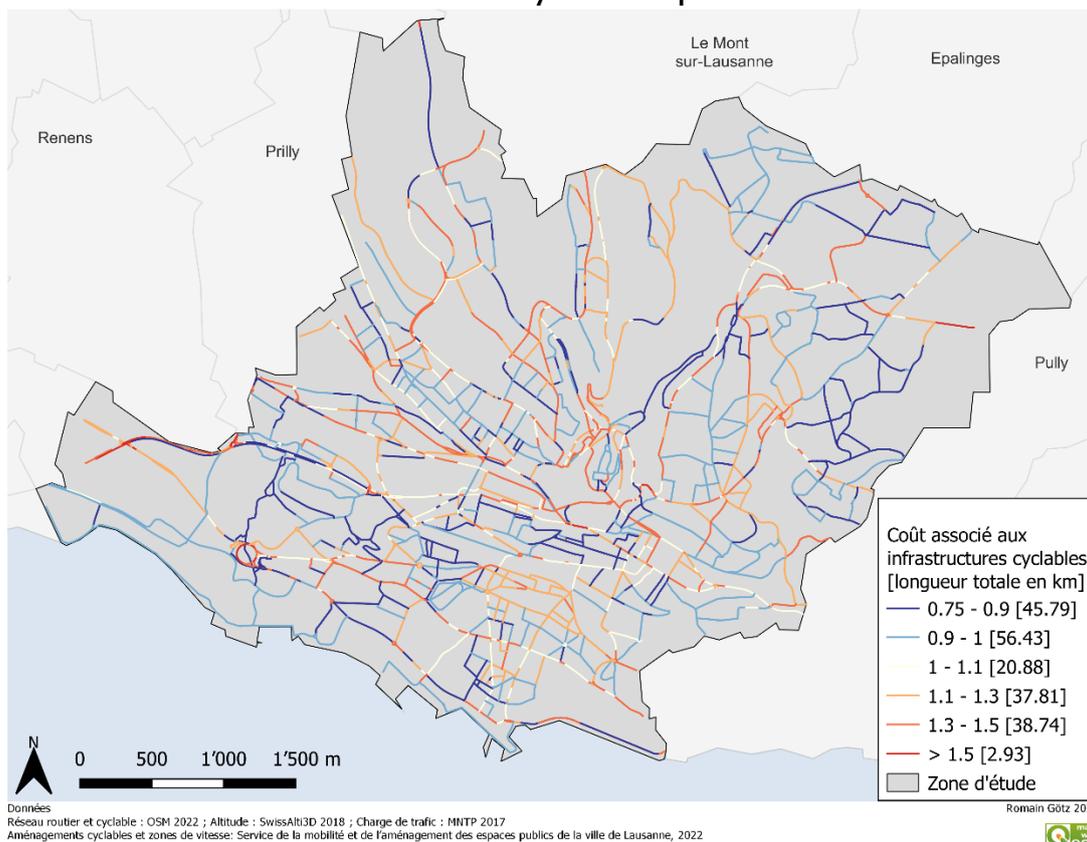


Figure 35: Carte pour les coûts associé aux infrastructures cyclables, à la vitesse et à la charge de trafic pour un sens de traversée.

À la Figure 35, des secteurs ressortent avec un niveau de sécurité assez homogène. Ce dernier peut être positif comme pour la zone au bord du Léman qui est pourvu d'un environnement plutôt accueillant pour les cyclistes. Ceci s'explique par une faible charge de trafic ainsi que des tronçons avec des aménagements cyclables entraînant une séparation du trafic motorisé ; il s'agit en grande partie de lieux partagés avec les piétons qui obtiennent un coût de 0.95 à cause de la cohabitation qui peut se révéler difficile. C'est aussi le cas pour certaines zones dans des quartiers plus résidentiels et plus éloignés du centre-ville. Par exemple pour les quartiers de Chailly-Rovéréaz et de Vallon-Béthusy (visibles plus facilement dans la Figure 36) qui se voient également attribuer de larges zones avec un niveau de sécurité et de confort positif. Ces quartiers reflètent des caractéristiques plus résidentielles avec un bâti moins dense que le centre-ville. Par conséquent, de nombreuses routes possèdent une charge de trafic assez faible et une limite de vitesse à 30 ou 20 km/h. Le niveau de sécurité et de confort est positif sans forcément avoir de nombreux aménagements cyclables en place.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Zoom sur trois zones pour le coût associé aux infrastructures cyclables

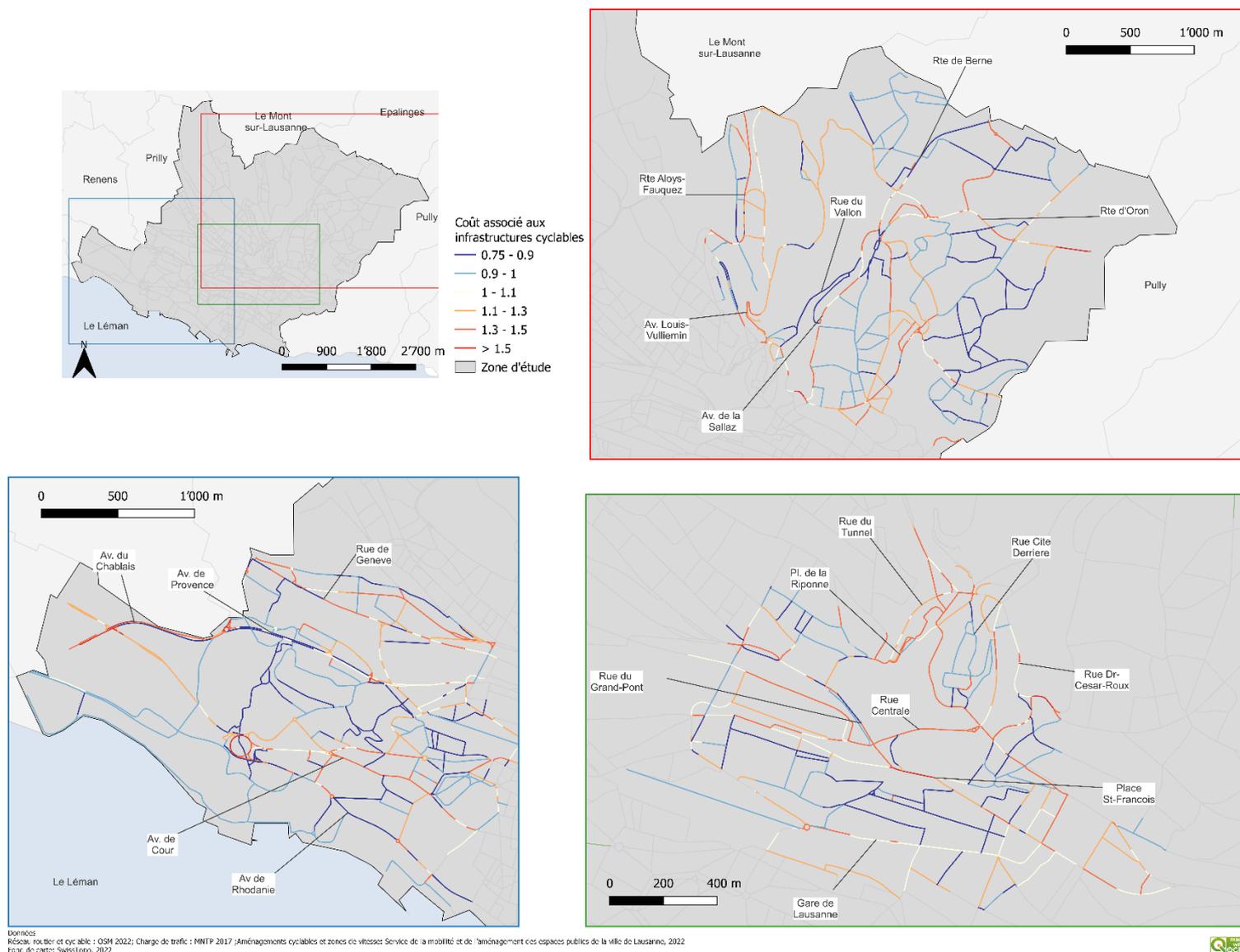


Figure 36: Carte du coût associé aux infrastructures cyclables. Mise en évidence de trois zones : les quartiers du nord-est dans la zone rouge, les quartiers du sud-ouest dans la zone bleue et le quartier du centre-ville dans la zone verte.

Néanmoins, il faut noter que chacun des deux quartiers est traversé par une route avec des coûts plus élevés. Pour le quartier de Vallon-Béthusy, il s'agit du tronçon composé de la rue du Bugnon puis de l'Avenue de la Sallaz et de la rue du Vallon qui permet de desservir l'autoroute à Grand-Vennes. Un point intéressant est que cette route possède une bande cyclable presque en continu. Or, dans cette situation, cet aménagement ne permet pas de contrebalancer les impacts négatifs d'une charge de trafic élevée, autour de 10'000 véhicules quotidiens, et une vitesse limitée à 50 km/h. Le quartier de Chailly est lui sillonné par l'Avenue Victor-Ruffly qui ne possède aucun aménagement cyclable. La charge de trafic est moins importante que pour le quartier du Vallon avec des valeurs autour de 3'000 véhicules/jour, mais la limite de vitesse reste à 50 km/h. Par conséquent, en l'absence d'aménagements cyclables, le niveau de sécurité est insuffisant.

Le quartier du centre-ville (visible à la Figure 36) contient des secteurs avec un bon niveau de sécurité. Ces derniers proviennent des différentes mesures pour atténuer le trafic motorisé avec la présence de zones piétonnes et de rencontre. En-dehors de ces secteurs, le niveau de sécurité est négatif avec des routes permettant de traverser la ville qui possèdent une charge de trafic importante et une limite de vitesse de 50 km/h. De plus, ces routes n'ont pas systématiquement d'aménagement cyclable mis en place, ou bien il s'agit principalement de bandes cyclables souvent étroites, qui ne permettent pas une séparation totale du trafic à cause du manque d'espace dû à la densité des bâtiments.

Comme déjà entraperçu avec l'analyse de certaines routes ci-dessus, on constate un phénomène problématique avec de longs tronçons qui possèdent des coûts élevés révélateurs d'une sécurité lacunaire. Cette situation est problématique puisque certaines de ces routes sont difficilement évitables pour traverser la ville et se rendre d'un quartier à un autre. On trouve par exemple les routes vers la forêt de Sauvabelin composées de l'Avenue Louis-Vulliemin, puis de la route du Pavement et de la route Aloys-Fauquez. Ces routes permettent de connecter le centre-ville avec le nord de Lausanne et le Mont-sur-Lausanne. Or, ces routes possèdent dans l'ensemble un coût élevé qui s'explique à nouveau par une charge de trafic importante, une vitesse élevée et des aménagements cyclables qui, lorsqu'ils sont présents, sont principalement des bandes cyclables, ne permettant pas de totalement contrebalancer les effets négatifs du trafic motorisé.

De plus, un autre phénomène spatial visible concerne la prédominance d'un niveau de sécurité lacunaire le long de grands axes routiers de transit (évoqués dans la section 5.2.2). Une corrélation positive est attendue entre la charge de trafic totale et la charge de trafic de poids lourds. Le problème est que ces routes possèdent soit une bande cyclable, soit aucun aménagement cyclable. Par conséquent, les cyclistes subissent les effets négatifs dus au trafic motorisé et à sa vitesse élevée, souvent 50 km/h. À nouveau, même la présence d'une bande cyclable sur ces axes routiers ne permet pas de totalement contrebalancer ces effets négatifs. Il est intéressant de noter que la Route de Berne ne rencontre pas cette caractéristique puisqu'une piste cyclable s'y trouve ; ceci permet d'avoir un bon niveau de sécurité malgré le trafic très important.

Un autre phénomène observable implique les discontinuités du réseau cyclable. En effet, les conditions de sécurité et de confort peuvent être très fluctuantes le long d'une route dès lors qu'un aménagement cyclable s'arrête. Par exemple, une partie de l'Avenue de La Sallaz peut être évitée en bifurquant à gauche sur la Rue du Vallon qui possède une piste cyclable, ce qui permet d'avoir un bon niveau de sécurité et de confort. Or, dès que la piste cyclable s'arrête, la qualité cyclable de la Rue du Vallon devient négative jusqu'à la Route de Berne et la nouvelle présence d'une piste cyclable sur un tronçon. En outre, le sens de traversée peut entraîner une perception très différente. Prenons l'exemple de l'Avenue du Chablais et de l'Avenue de Provence. En partant du carrefour de la Bourdonnette dans le sens de la montée, la présence d'une piste cyclable a pour conséquence une perception positive. Néanmoins, dès que l'aménagement s'arrête, la perception devient très négative à cause du trafic important et de la présence du giratoire de Malley. Ensuite, sur l'Avenue de Provence, il y a une perception positive avec la mise en place d'une bande cyclable, même si celle-ci est entrecoupée par des discontinuités. Dans le sens contraire, il existe aussi une impression positive pour l'Avenue de Provence qui contient une piste cyclable, néanmoins également entrecoupée de discontinuités. La grosse différence se trouve lors de la descente de l'Avenue du Chablais qui entraîne un manque de

sécurité, même en présence d'une bande cyclable car celle-ci ne permet pas de contrebalancer une charge de trafic et une limite de vitesse élevées. En outre, même si cet élément n'a pas été intégré dans ce travail, il faut noter que la qualité de cette route est médiocre, avec de nombreuses aspérités dues à des trous et des plaques d'égout qui entraînent des secousses et une difficulté à freiner pour les cyclistes.

5.2.5 Qualité cyclable des liens

Pour la qualité cyclable des liens, différentes cartes sont réalisées afin de pouvoir mieux visualiser l'information. La qualité cyclable pour l'ensemble du territoire est visible dans la Figure 37 et la Figure 38. La première carte présente la qualité cyclable pour le sens de traversée de l'axe nord-sud majoritairement en montée alors que la seconde carte présente le sens de traversée inverse. Comme la qualité cyclable est très influencée par le sens de traversée pour la pente, il est nécessaire de présenter les deux sens de traversée. La dernière carte présentée dans la Figure 39 s'intéresse à trois secteurs particuliers pour analyser en détails leur qualité cyclable. De plus, les intersections sont aussi intégrées lors de l'analyse de ces trois zones pour mettre en avant les interactions possibles entre les routes et les intersections.

À travers les deux premières cartes, on constate que dans l'ensemble c'est une qualité cyclable négative qui prédomine ; les 3 catégories avec les plus grandes valeurs représentent environ la moitié du réseau cyclable. Les catégories d'une qualité cyclable positive, c'est-à-dire en-dessous de 1, constituent entre 25 % (Figure 37) et 30 % (Figure 38) du réseau alors qu'une qualité cyclable moyenne complète avec environ 20 % du réseau. La répartition de la qualité cyclable pour les deux sens de traversée reste similaire. Cependant, cette qualité cyclable peut refléter différentes situations explorées plus bas.

Dans les deux cartes, la zone tout au bord du Léman se distingue par une bonne qualité cyclable. Les tronçons de cette zone ressortaient déjà avec des valeurs positives pour les différentes composantes de la qualité cyclable, il est donc attendu que la qualité cyclable soit bonne. Cette dernière est positivement influencée par une cohabitation très faible avec le trafic motorisé due à la mise en place de zones piétonnes ouvertes aux vélos et de tronçons de piste cyclable. De plus, cette zone bénéficie d'une faible charge de trafic, d'une déclivité peu marquée de par sa situation sur l'axe est-ouest et d'un environnement agréable avec la présence du Léman et de parcs le long du rivage.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Qualité cyclable totale pour un sens de circulation

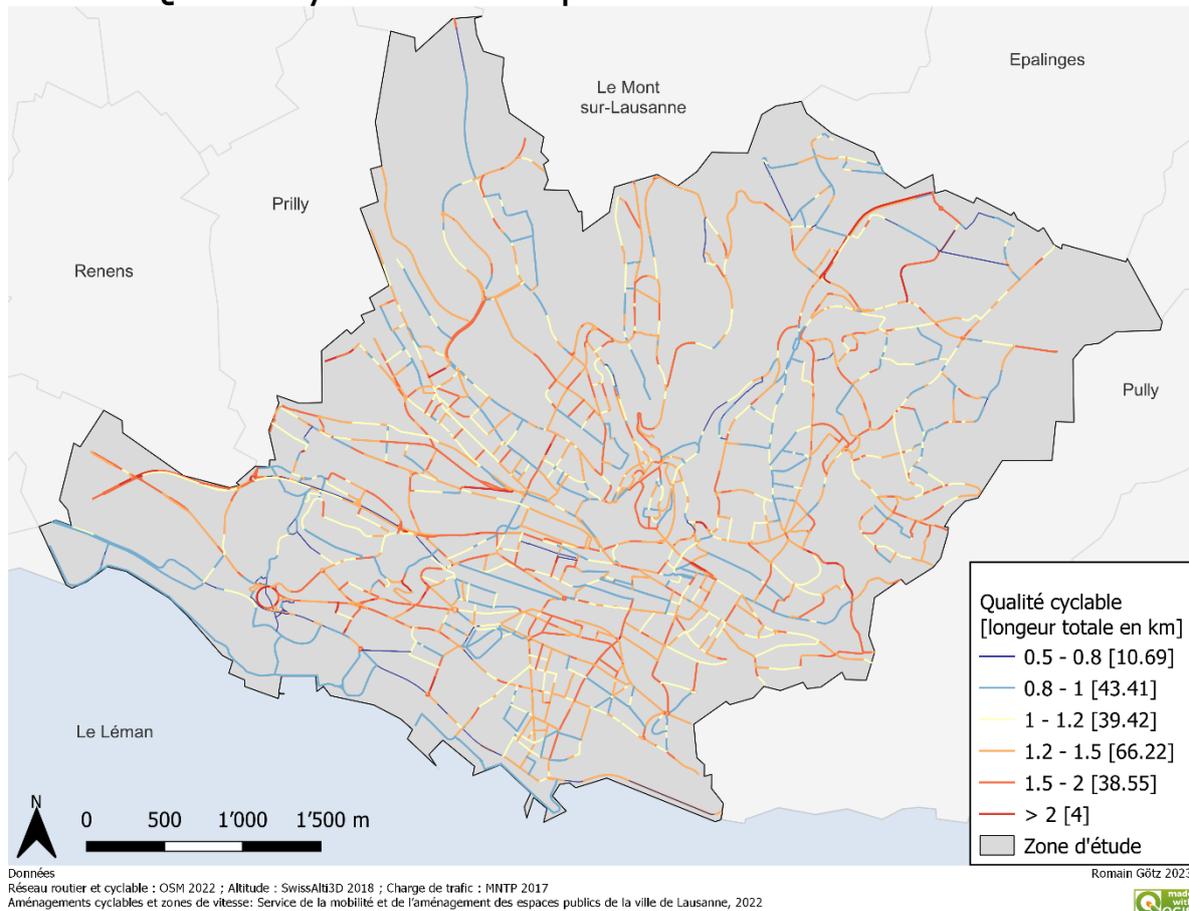


Figure 37: Carte de la qualité cyclable pour la ville de Lausanne dans le sens de traversée u-v.

Le coût associé à la topographie joue un rôle essentiel dans la possibilité d'une mauvaise qualité cyclable, ce même si le coût associé aux infrastructures cyclables est plutôt bon. C'est le cas pour le quartier de Chailly-Roveréaz qui, étant un quartier plutôt résidentiel sans charge de trafic élevée, se voit finalement plutôt attribuer une mauvaise qualité cyclable à cause des déclivités très fortes liées à sa situation sur l'axe nord-sud. Il y a un phénomène assez similaire pour les secteurs du quartier du centre-ville qui ressortaient comme positives avec certaines zones piétonnes ou de rencontre (section 5.2.4) qui obtiennent une qualité cyclable moyenne avec certaines déclivités importantes. Un autre phénomène pour la prédominance d'une qualité cyclable négative réside dans le renforcement entre la présence de trafic de poids lourds et l'absence d'aménagement cyclable permettant une séparation complète du trafic. Ainsi, les différents axes routiers pour le transit de camion ressortent avec une mauvaise qualité cyclable. Certains tronçons vont de plus être renforcés par une déclivité assez forte ; c'est le cas de l'Avenue du Mont-d'Or.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Qualité cyclable totale pour le sens de circulation inverse

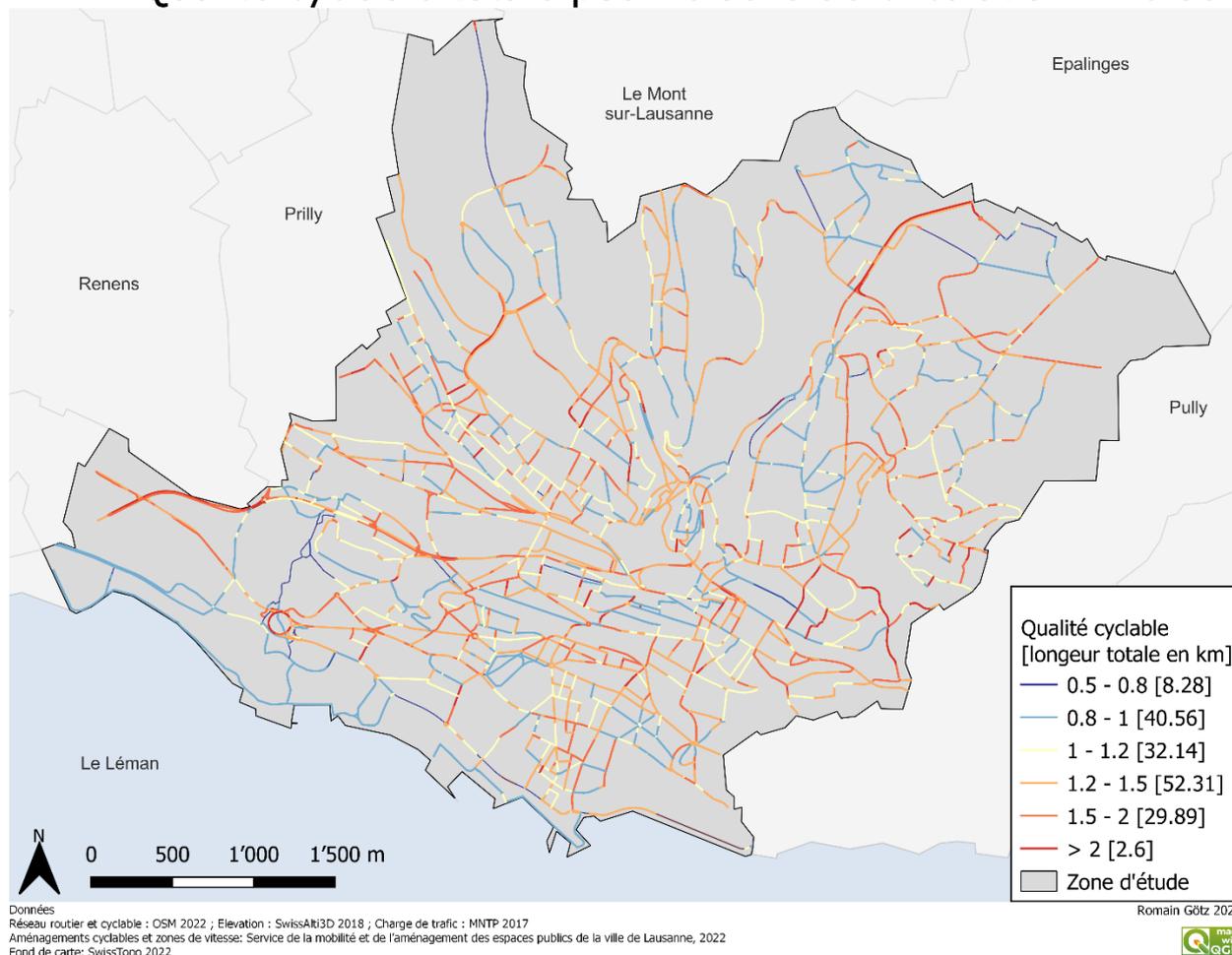


Figure 38: Carte de la qualité cyclable totale pour le sens de traversée inverse à la Figure 37.

Comme il est difficile d'analyser en profondeur les données des deux premières cartes, la suite de l'analyse se concentre sur la Figure 39. Cette carte fait le zoom sur des secteurs qui représentent des situations intéressantes au niveau des interactions dynamiques possibles entre les différentes composantes de la qualité cyclable. Concernant le sens de traversée, il s'agit de celui dans le sens de la montée pour l'axe nord-sud comme pour la Figure 37.

La première zone mise en évidence se situe au sud-ouest de la ville de Lausanne. Elle est traversée par un axe majeur à travers l'Avenue du Chablais, l'Avenue de Provence et l'Avenue de Tivoli qui permet, entre autres, de connecter le campus de l'Université de Lausanne au centre-ville. Dans le sens de la montée, l'Avenue du Chablais possède une qualité acceptable puisqu'une piste cyclable est mise en place. C'est la forte pente qui entraîne une perception négative avec un effort important à fournir. L'Avenue de Provence qui suit possède aussi une qualité acceptable avec la présence d'une bande cyclable qui permet de contrebalancer en partie la charge de trafic et la limite de vitesse élevées. Les plus gros problèmes de sécurité et de confort posés par cette axe vont venir de la présence de deux intersections problématiques : le carrefour de la Bourdonnette et le giratoire de Malley. Le premier est une intersection avec signalisation lumineuse qui pose de sérieux problèmes au niveau de sa sécurité. En effet, le nombre de voies de circulation est supérieures à 2 et le trafic est très élevé avec

l'addition de la présence de poids lourds. Or, ce carrefour possède assez peu d'aménagements cyclables : quelques sas vélo sont présents mais ils ne sont pas facilement accessibles et demandent de slalomer entre les voies de circulation pour les atteindre. Le giratoire de Malley, qui fait le lien entre l'Avenue du Chablais et l'Avenue de Provence, est quant à lui un grand giratoire avec un grand anneau de circulation ainsi qu'une charge de trafic et une vitesse élevées. Dans le sens de la descente, la qualité cyclable plutôt positive de l'Avenue de Provence, due à la présence d'une piste cyclable quasi continue, mène à ce giratoire très problématique qui nécessite d'être traversé en tournant à gauche pour rejoindre l'Avenue du Chablais. Cette dernière possède une mauvaise qualité cyclable dans ce sens de traversée et amène finalement au carrefour de la Bourdonnette. Une alternative possible à ce trajet pourrait s'avérer intéressante. Elle commence plus au sud et passe par la Route de Vidy, ou encore plus au sud avec la Promenade de Vidy qui longe le bord du Léman. La suite du trajet rejoint le Rond-Point de la Maladière, qui est contourné en passant au-dessous, pour monter par le parc de la Vallée de la Jeunesse et rejoindre l'Avenue de Provence. Cette alternative possède une très bonne qualité cyclable puisque la partie qui longe le lac possède une déclivité négligeable et une interaction quasi-inexistante avec le trafic. La suite du trajet à travers la Vallée de La Jeunesse possède des pentes plus fortes à affronter mais comme une piste cyclable est présente, la qualité cyclable reste positive. De plus, cette alternative peut permettre d'éviter les deux intersections problématiques mises en avant.

La deuxième zone mise en évidence présente une large partie du nord lausannois. Cette zone est intéressante, car elle fait le lien entre le centre-ville de Lausanne et les différents quartiers au nord de la ville selon différents axes possibles. Un premier axe relie le centre-ville au quartier de Bellevaux et au Mont-sur-Lausanne en suivant l'Avenue Louis-Vulliemin, la route du Pavement puis la Route Aloys-Fauquez. Ce tronçon a déjà été mis en avant comme problématique lors de l'analyse du coût associé aux aménagements cyclables. Cette négativité est renforcée par le coût associé à la topographie, étant donné que ce tronçon se situe sur l'axe nord-sud et possède des déclivités positives très importantes pour ce sens de traversée. Une autre possibilité pour rejoindre ce quartier passe par la rue de la Borde pour rejoindre la Route Aloys-Fauquez. La rue de la Borde démontre l'impact positif de la présence d'aménagements cyclables. Pour cette rue, la charge de trafic est élevée, soit de 9'000 véhicules / jour, et la pente est assez forte, autour de 6%. Une partie de la rue est le témoin de la mise en place d'aménagements cyclables, parallèles à la rue, qui permettent une séparation totale du trafic et rendent ainsi la qualité cyclable positive. Malheureusement, ce tronçon est entouré par une mauvaise qualité cyclable dès lors que les aménagements disparaissent et que dans le même temps la cohabitation avec le trafic motorisé refait son apparition.

Un axe différent, qui se divise en deux, permet de relier le quartier de Borde-Bellevaux et les autres quartiers au nord-ouest de la ville. Le tronçon débute par l'Avenue de Beaulieu et se sépare ensuite en deux. La première partie poursuit par l'Avenue du Mont-Blanc pour rejoindre le quartier Bord-Bellevaux et la Route Aloys-Fauquez. La seconde partie continue sur l'Avenue des Bergières puis l'Avenue de Grey pour rejoindre le quartier des Bossons.

Les avenues de Grey et de Beaulieu possèdent une situation très similaire : une mauvaise qualité cyclable due à des aménagements cyclables quasi-inexistants et une déclivité très forte aux alentours de 10 %. L'Avenue du Mont-Blanc est marquée par des portions avec une piste cyclable ou une bande cyclable entrecoupées par une absence d'aménagement. Dans ce cas, même le tronçon avec la piste

cyclable se voit attribuer une qualité cyclable moyenne à cause du fort coût associé à la topographie qui dépasse 10 % et représente un effort physique important. Finalement, l'Avenue des Bergières possède une qualité cyclable assez bonne, car étant sur l'axe est-ouest elle présente des déclivités moins grandes et qu'une bande cyclable se trouve quasiment en continu. Néanmoins, on constate de légères discontinuités en certains points au niveau de la qualité cyclable dues à l'arrêt de la bande cyclable. Pour le sens de traversée inverse, les différents axes évoqués se voient également attribuer une qualité cyclable négative dans l'ensemble. En effet, ces rues possèdent des pentes qui dépassent les -6 %, ce qui entraîne un possible manque de sécurité à cause de la grande vitesse. En outre, très peu d'aménagements cyclables sont mis en place dans le sens de la descente en ville de Lausanne. À nouveau, la rue de la Borde est intéressante puisqu'une partie de la rue possède une voie de bus autorisée aux cycles pour la descente, ce qui permet d'atténuer la forte charge de trafic. Cependant, l'arrêt de cet aménagement entraîne un sérieux problème de sécurité puisque les cyclistes doivent se réengager dans le trafic avec une vitesse élevée.

La troisième et dernière zone de la Figure 39 comporte principalement le quartier Sous-Gare-Ouchy. Ce quartier est intéressant puisqu'il est un des quartiers les plus peuplés de la ville et qu'il accueille la gare de Lausanne. Cette zone est traversée par l'Avenue du Rhodanie, la route au bord du lac Léman qui traverse la ville de Lausanne d'est en ouest. La qualité cyclable des liens est dans l'ensemble très bonne avec la présence de tronçons de piste cyclable et de voies de bus ainsi que de bandes cyclables. Il est en fait très rare que l'avenue n'ait pas d'aménagements cyclables. L'aspect négatif réside dans la présence de deux giratoires problématiques qui peuvent être source de grand stress pour un-e cycliste. Par conséquent, la perception positive des rues est contrebalancée par la perception négative des giratoires.

Un dernier élément à noter pour cette troisième zone concerne l'accès à la gare de Lausanne. En effet, celui-ci n'est malheureusement pas possible avec une bonne qualité cyclable. Pour rejoindre la gare depuis Ouchy, un-e cycliste pourrait décider de suivre l'Avenue Frédéric-César-de-la-Harpe. Cette avenue comporte une qualité cyclable négative à cause de sa forte pente et d'aménagements cyclables pas assez sécurisants avec la présence d'une bande cyclable discontinuée. En suivant cette avenue, un-e cycliste se verrait obligé-e de passer par le giratoire sur l'Avenue Edouard-Dapple qui possède une mauvaise qualité cyclable, avant de remonter par l'Avenue William-Fraisse qui possède également une mauvaise qualité cyclable avec des caractéristiques proches de l'Avenue Frédéric-César-de-la-Harpe. Enfin, un-e cycliste devrait également traverser le giratoire de la Place de la Gare avant d'arriver à la gare de Lausanne. Afin d'éviter de devoir passer par ces deux giratoires, il est possible de passer par l'Avenue d'Ouchy un peu plus à l'est, qui est parallèle à l'Avenue Frédéric-César-de-la-Harpe. Cependant, ce second itinéraire possible n'entraîne pas forcément une amélioration significative de la qualité cyclable puisque l'Avenue d'Ouchy possède des caractéristiques très similaires avec de très fortes pentes et la présence d'une bande cyclable uniquement sur certains segments. En outre, passer par cette avenue demande de traverser deux intersections avec feux de signalisation qui peuvent entraîner un arrêt en plein effort et un redémarrage en montée.

Qualité cyclable de la Ville de Lausanne, 2022

Zoom sur trois zones d'intérêt concernant la qualité cyclable dans son ensemble

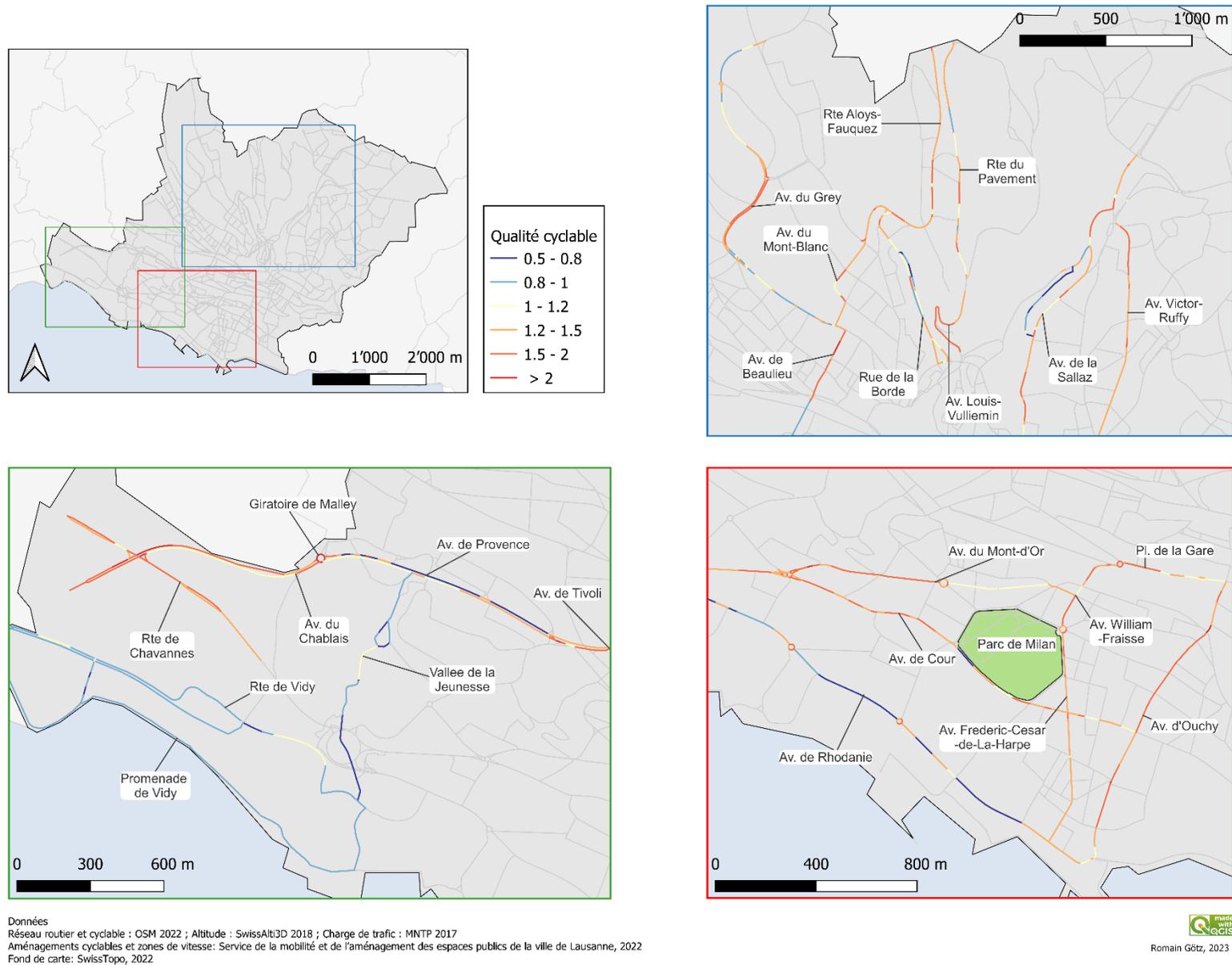


Figure 39: Carte de la qualité cyclable pour trois zones d'intérêt pour la ville de Lausanne.

Un autre axe qui permet de rejoindre le quartier sous-gare passe soit par l'Avenue du Mont-d'Or, soit par l'Avenue de Cour. Pour la première, la qualité cyclable se révèle très problématique tant au niveau des liens que des intersections. Les causes de cette situation résident dans un manque d'aménagements cyclables face à une charge de trafic élevée ainsi que d'une présence importante de poids lourds. En outre, cette avenue est coupée par deux giratoires, dont le deuxième présente des aspects négatifs au niveau de sa sécurité. Quant à l'Avenue de Cour, elle offre aussi globalement une mauvaise qualité cyclable puisqu'elle possède des caractéristiques très similaires. Le seul point positif est qu'elle ne nécessite pas la traversée d'un giratoire.

L'analyse de ces trois zones permet de mettre en évidence des lacunes fondamentales au niveau de la sécurité et du confort du réseau cyclable de la ville de Lausanne. En effet, les axes routiers directs du territoire se retrouvent avec une mauvaise qualité cyclable. Cette dernière est le résultat, soit d'une absence d'aménagements cyclables, soit d'une présence d'une bande cyclable. Or, cette dernière, même si elle représente une amélioration par rapport à une absence complète d'aménagements, ne permet pas de totalement contrebalancer les effets négatifs d'une charge de trafic importante et d'une vitesse élevée. Ces caractéristiques se retrouvent en outre possiblement exacerbées par une forte pente qui, en montée, entraîne une baisse de la sécurité à cause de la différence de vitesse encore plus grande entre les cyclistes et les véhicules motorisés.

5.3 Application de routing

5.3.1 Présentation de l'interface côté utilisateur·trice

La page d'accueil de l'application web (Figure 40) est séparée en deux éléments principaux : la carte Leaflet sur la gauche et une sidebar sur le côté droit. La carte Leaflet contient le territoire délimité pour l'application en noir. La partie sur le côté droit comporte une explication sur l'application et son fonctionnement, ce qui permet de donner un contexte à l'utilisateur·trice. Elle contient aussi les barres de recherche pour les adresses, les boutons de localisation, et les boutons pour personnaliser les paramètres de la qualité cyclable. L'application peut être séparée en 2 temps : le premier temps est la partie avec laquelle on détermine le point de départ et d'arrivée alors que le deuxième temps concerne le trajet proposé et son exploration.

VéloRouter Lausanne : Proposition d'itinéraire sûr et confortable

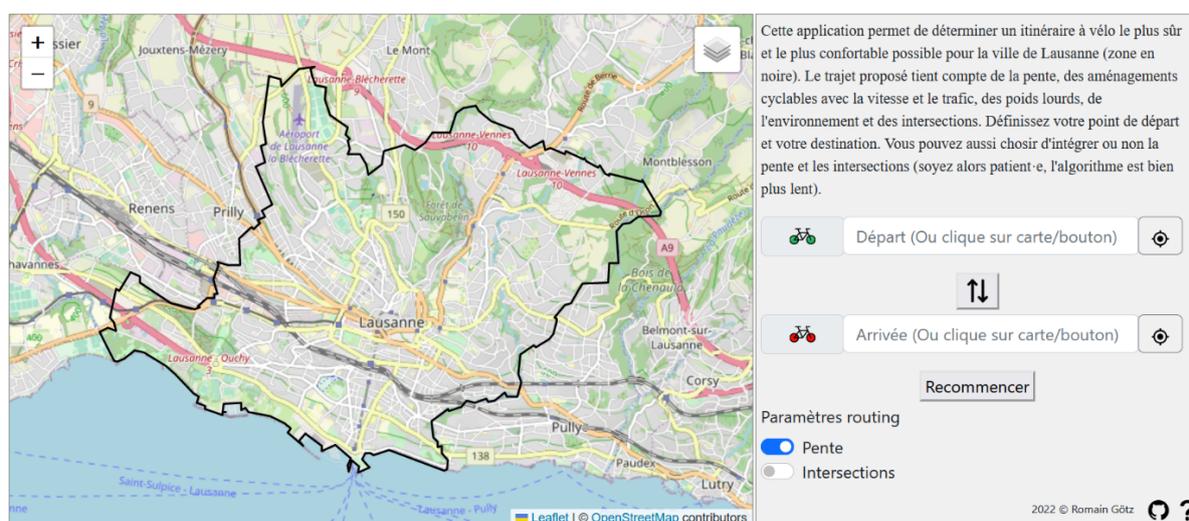


Figure 40: Page web d'accueil de l'application VéloRouter Lausanne.

Pour déterminer la position de départ et d'arrivée, 4 possibilités existent :

I. Cliquer sur la carte

En cliquant tout simplement sur la carte Leaflet, l'utilisateur·trice peut déterminer la position de départ ou d'arrivée. Un marqueur apparaît alors à cette position. Ce marqueur est différent pour le départ et pour l'arrivée. Par défaut, le premier clic sur la carte définit la position de départ, et le deuxième clic définit la position d'arrivée. Une fois que le départ et l'arrivée sont déterminés, un clic supplémentaire sur la carte entraîne l'apparition d'un message d'erreur expliquant que cette étape a déjà été effectuée.

II. Déterminer la localisation actuelle en cliquant sur le bouton de localisation



Figure 41: Bouton de localisation.

L'utilisateur·trice peut aussi définir sa localisation actuelle en cliquant sur un bouton. Il ou elle doit pour cela autoriser l'application à avoir accès à sa position.

III. Rechercher une adresse

Il est également possible de rechercher des adresses en tapant dans les deux barres de recherche pour le départ et l'arrivée. Si plusieurs résultats correspondent à l'adresse recherchée, c'est par défaut le premier résultat qui est sélectionné. L'adresse correspondante est alors ajoutée à la barre de recherche d'adresse et le marqueur est ajouté à la carte.

IV. Inverser le départ et l'arrivée

Lorsque les points de départ et d'arrivée ont déjà été déterminés, il est possible de les inverser en cliquant sur le bouton entre les deux barres de recherche. Cette interactivité n'est possible que si les points ont été définis, sinon un message d'erreur s'affiche.

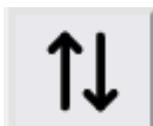


Figure 42: Bouton pour inverser le point de départ et d'arrivée.

Le côté droit de l'application comporte aussi deux boutons qui permettent de personnaliser les paramètres à prendre en compte pour le trajet à déterminer. Ce choix se fait à travers un *toggle button* qui possède deux états : activé ou non. À chaque changement d'état d'un des boutons, l'algorithme de routing est relancé avec les nouveaux paramètres, pour autant que les points de départ et d'arrivée sont définis.

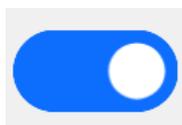


Figure 43: Toggle button activé pour la personnalisation des paramètres pour la qualité cyclable.

Il existe deux boutons pour les différents paramètres :

I. Pente

Ce paramètre concerne la prise en compte de la pente dans la qualité cyclable. Par défaut, le bouton est activé.

II. Intersections

Ce paramètre concerne la prise en compte des intersections et de leur qualité cyclable dans l'algorithme de routing. Par défaut, ce bouton est désactivé pour des questions de rapidité de l'algorithme ; ce dernier est bien plus lent lorsqu'il intègre le coût des intersections.

Finalement, il existe encore un bouton d'interactivité pour l'utilisateur·trice dans la partie sur le côté :

I. Réinitialiser l'application en appuyant sur le bouton « Recommencer »

En appuyant sur ce bouton, l'application est remise à zéro. Les points de départ et de destination ainsi que le trajet sont enlevés s'ils existent sur la carte, alors que les boutons sont remis à leur valeur par défaut.

Recommencer

Figure 44: Bouton recommencer qui permet de remettre à zéro l'application.

Dès que le point de départ et de destination sont déterminés, l’algorithme de routing se lance (détaillé plus bas), puis l’itinéraire trouvé est affiché avec une coloration en fonction de la qualité cyclable comme visible sur la Figure 45. Deux autres éléments apparaissent avec la légende de la qualité cyclable en haut à droite et des informations sur le lien en haut à gauche si l’utilisateur·trice balade sa souris sur le trajet. Pour la légende de la qualité cyclable, les valeurs numériques ont été transformées en catégories allant de « Très bonne » à « Extrêmement mauvaise » pour faciliter la compréhension.



Figure 45: Exemple d'un itinéraire affiché entre deux points définis par un clique sur la carte.

L’utilisation de Leaflet permet d’avoir à disposition deux fonctionnalités très utiles pour explorer plus en détail le trajet proposé :

- I. Le zoom et le *pan* permettent de se déplacer très librement sur la carte et d’explorer les différentes directions et rues à prendre.
- II. Le changement de fond de carte permet de visualiser différemment l’environnement autour du trajet avec 3 possibilités :
 1. OpenStreetMap : un fond de carte classique qui est le fond par défaut.
 2. CyclOpenStreetMap : un fond de carte spécifique au réseau cyclable qui permet de communiquer des informations complémentaires comme les stationnements, les pompes à vélo, etc.
 3. Image Satellite ESRI : un fond de carte avec une image satellite pour permettre de voir l’environnement tel qu’il est.

5.3.2 Présentation du fonctionnement côté serveur

Du côté du serveur, les fichiers HTML, CSS et Javascript permettent de structurer l'affichage de la page web, de gérer l'interactivité et de régler les options de design visuel. En plus de cela, l'application comporte un fichier `app.py` qui utilise le *framework* Flask. C'est ce fichier qui comporte l'algorithme de routing et se met en route une fois que les points de départ et d'arrivée sont déterminés.

Tout d'abord, quand l'application est lancée, le fichier `app.py` réalise quelques opérations avant même de créer la page web :

- I. Téléchargement des données nécessaires pour le coût des intersections, la frontière de Lausanne, et construire le graphe.
- II. Création du graphe à partir de la liste des liens et de la liste de nœuds.
- III. Création d'un *spatial tree* des nœuds du graphe.

Une fois que le point de départ et d'arrivée sont déterminés, les choix de l'utilisateur·trice (départ, arrivée, variables pour l'algorithme) sont envoyés dans le code de l'application Flask depuis le fichier Javascript et les étapes suivantes sont réalisées :

- i. Déterminer le nœud du graphe le plus proche pour le point de départ et pour le point d'arrivée en utilisant le *spatial tree*.
- ii. Déterminer le chemin le plus court dans le graphe entre le nœud de départ et le nœud de destination.

Pour déterminer le chemin le plus court, c'est la distance perçue qui est utilisée comme poids. Ceci permet de déterminer un chemin qui va maximiser la qualité cyclable le long du trajet. Cette manière de procéder permet de trouver un équilibre entre la qualité cyclable et le temps de parcours. En effet, l'algorithme va déterminer le chemin avec la distance perçue totale la plus basse possible qui représente le chemin avec la meilleure qualité cyclable. De plus, utiliser la distance perçue permet d'éviter d'obtenir des trajets avec des détours trop importants et un temps de parcours très élevé. Il y a deux algorithmes différents qui sont utilisés :

- I. Sans tenir compte des intersections, c'est l'algorithme de Dijkstra classique du package python *NetworkX* qui est utilisé en définissant le poids comme la distance perçue.
- II. Avec les intersections, c'est une version modifiée de l'algorithme de Dijkstra, développée dans le cadre de ce travail, qui est utilisée en définissant le poids comme la distance perçue et en intégrant le tableau du coût des intersections. Ce tableau nécessite au minimum 4 colonnes : le nœud de l'intersection, le nœud précédant l'intersection, le nœud après l'intersection, et une valeur pour le coût. L'algorithme de Dijkstra est modifié de telle sorte que pour chaque nœud qui est parcouru, il est vérifié s'il s'agit d'une intersection en cherchant si le nœud est présent dans la colonne « id du nœud de l'intersection » du tableau des coûts des intersections. Si c'est le cas, alors la relaxation du lien se fait en comparant la somme du coût du lien et du coût de l'intersection par rapport au poids cumulé.
- iii. Envoyer au fichier Javascript les liens du graphe composants l'itinéraire trouvé par l'algorithme en utilisant la fonction *fetch()*.

5.3.3 Exemples de fonctionnement

Pour les secteurs mis en avant dans la section 5.2.5, certains trajets proposés par l'application en fonction des différents paramètres sont présentés afin de constater le fonctionnement de l'algorithme de *routing*.

Les premiers trajets présentés se trouvent dans la zone au sud-ouest de la ville de Lausanne (zone 1 dans la Figure 39). Le chemin visible à la Figure 46 se situe entre le campus de l'Université (qui se trouve juste à l'extérieur de la zone d'étude) et le Flon à Lausanne, et n'intègre pas les intersections. Le trajet longe la Route de Vidy pour remonter par la Vallée de la Jeunesse et rejoindre l'Avenue de Provence. Cela permet d'éviter l'Avenue du Chablais et le giratoire de Malley. Pour être précis, ce dernier est en fait déjà intégré même sans le paramètre « Intersections » puisque les giratoires conservent leur forme dans le graphe et sont composés de plusieurs liens.



Figure 46: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le campus de l'Université et le point d'arrivée au Flon. Les paramètres de l'algorithme intègre la pente, mais pas les intersections.

Le trajet proposé en intégrant les intersections à l'algorithme est visible à la Figure 47. Le début du trajet est identique pour rejoindre l'Avenue de Provence. La différence réside dans l'évitement du carrefour précédant le Pont Chauderon. En effet, ce mouvement ne se fait pas dans de bonnes conditions de sécurité puisqu'il y a deux voies de circulation pour le trafic mais aucun aménagement cyclable en place, même un sas vélo.

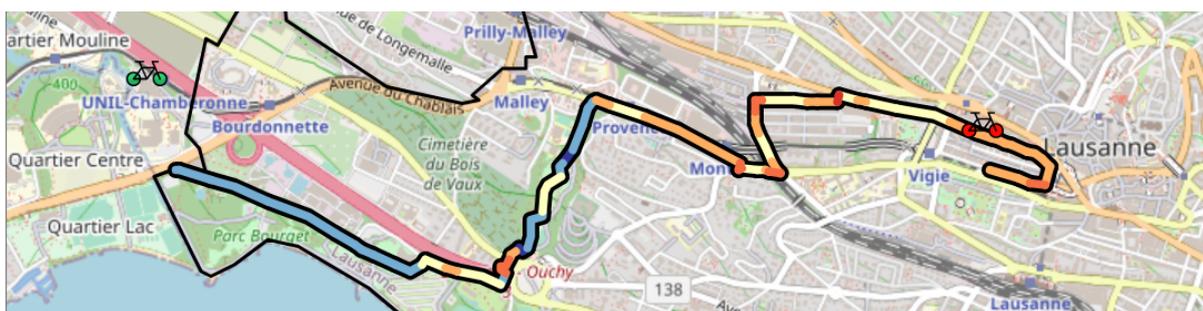


Figure 47: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le campus de l'Université et le point d'arrivée au Flon. Les paramètres de l'algorithme intègrent la pente et les intersections.

Les seconds trajets proposés sont situés dans la 2^{ème} zone (Figure 39). Il s'agit d'un parcours qui fait le lien entre l'est du centre-ville et le quartier Sallaz-Vennes tout au nord. Le point de départ défini est le Parc de Mon-Repos pour arriver au Chemin de Bérée. Le chemin proposé dans la Figure 48 n'intègre pas les intersections. On constate que ce chemin évite l'Avenue Victor-Ruffly et l'Avenue de la Sallaz pour passer par une rue parallèle, l'Avenue de Beaumont. Cette dernière ne possède pas d'aménagements cyclables, mais une charge de trafic beaucoup moins importante et une vitesse limitée à 30 km/h. Ces caractéristiques engendrent des conditions bien plus accueillantes pour un-e

cycliste. Pour la partie plus au nord du trajet, ce dernier va rejoindre la Route d'Oron afin d'éviter la route de Berne qui a une charge de trafic très importante, autour de 20'000 véhicules, au vu de son lien avec la desserte d'autoroute de Grand-Vennes. Il est intéressant de noter que le trajet en intégrant les intersections donne le même résultat. Par conséquent, le giratoire sur la route d'Oron ne peut pas être raisonnablement évité par un trajet avec des intersections plus sécurisées.

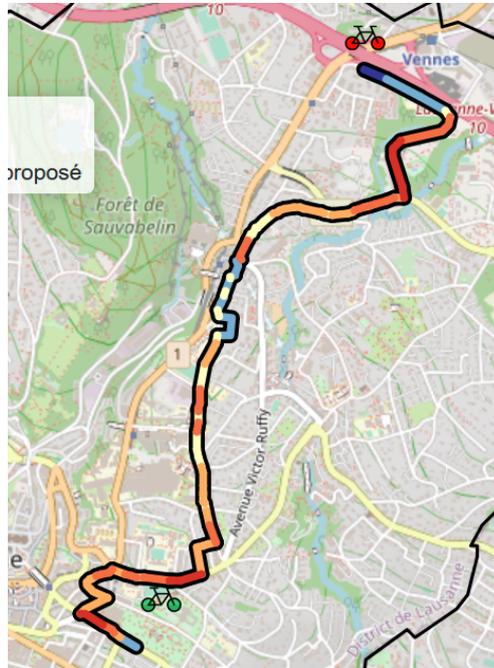


Figure 48: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ le Parc de Mon-Repos et le point d'arrivée au Chemin de Bérée. Les paramètres de l'algorithme n'intègrent pas les intersections.

Pour la 3^{ème} zone de la Figure 39, c'est un exemple entre un point de départ au bord du lac à Vidy et la Gare de Lausanne comme point de destination qui est démontré.

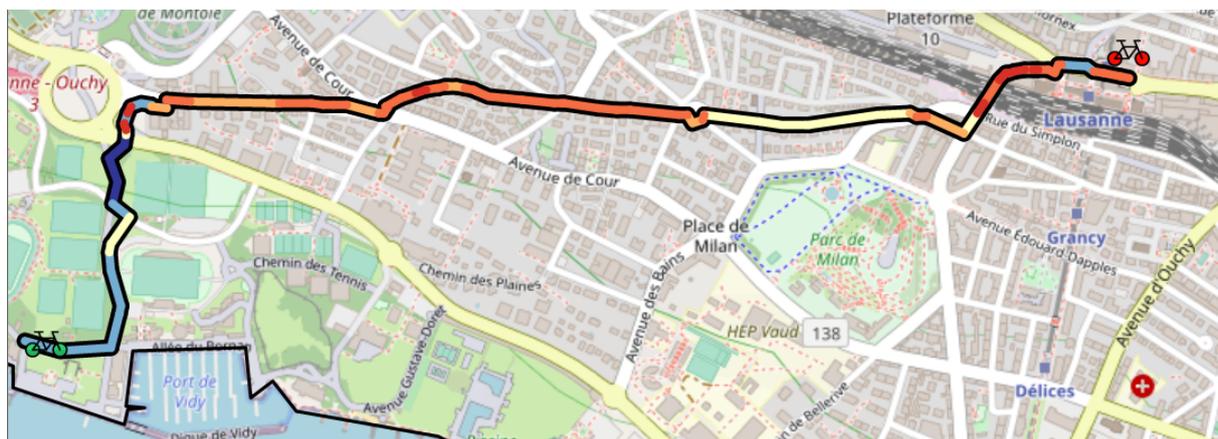


Figure 49: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ un point au bord du lac au Port de Vidy et un point d'arrivée à la Gare de Lausanne. Les paramètres de l'algorithme n'intègrent pas les intersections.

Lorsque l'algorithme n'intègre pas les intersections (Figure 49), le trajet proposé remonte en direction du Rond-Point de la Maladière pour rejoindre l'Avenue du Mont-d'Or qui est suivie jusqu'à l'Avenue William-Fraisse avant de rejoindre la Place de la Gare. Cette proposition possède le défaut de longer l'Avenue du Mont-d'Or caractérisée par une mauvaise qualité cyclable à cause du trafic important, du manque d'infrastructures cyclables et de la présence de poids-lourds. En outre, le trajet nécessite de

traverser trois giratoires, dont deux relevés comme problématiques sur l'Avenue du Mont-d'Or et sur la Place de la Gare. Le fait que l'algorithme propose de passer par cette avenue, même sans intégrer les intersections, est quelque peu contre-intuitive au vu de sa mauvaise qualité cyclable. De plus, le coût associé aux deux giratoires problématiques est déjà intégré dans ce trajet.

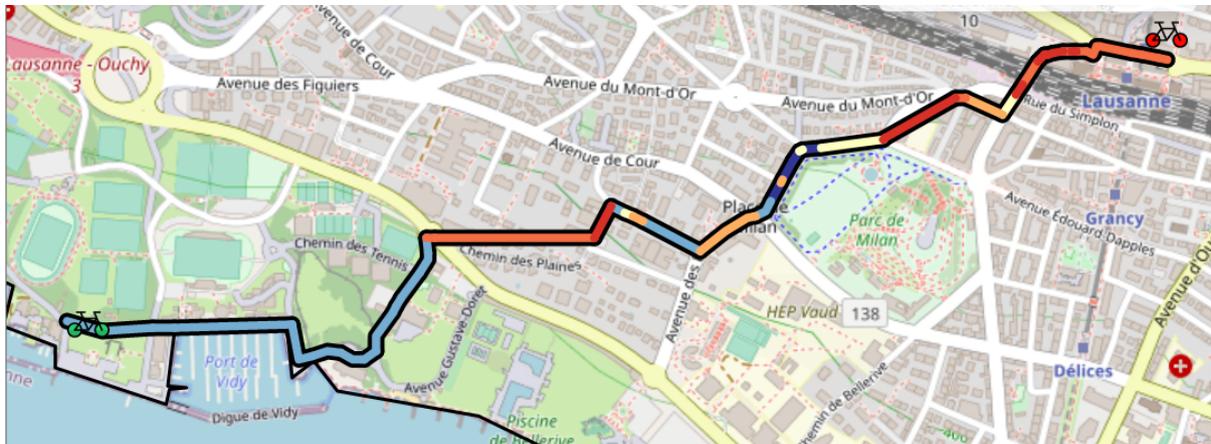


Figure 50: Trajet proposé par l'application avec comme point de départ un point au bord du lac au Port de Vidy et un point d'arrivée à la Gare de Lausanne. Les paramètres de l'algorithme intègrent aussi les intersections.

En intégrant les intersections à l'algorithme (Figure 50), on constate que le trajet évite l'Avenue du Mont-d'Or en passant par le Chemin des Plaines, interdit au trafic hors résident-e-s, pour longer ensuite le Parc de Milan et rejoindre la Place de la Gare par l'Avenue William-Fraisse. Par conséquent, un-e cycliste évite l'Avenue du Mont-d'Or, très lacunaire au niveau du confort et de la sécurité. Le segment au bord du Parc de Milan possède aussi la caractéristique positive d'être une piste cyclable.

5.3.4 Bilan et pistes d'amélioration et de réflexions

L'application développée est fonctionnelle et permet de déterminer un trajet permettant de maximiser la qualité cyclable d'un trajet, et ceci de manière relativement facile et intuitive pour l'utilisateur-ice. Néanmoins, il est important de noter que l'application telle qu'elle existe est une 1^{ère} étape et non un produit fini diffusable à une large échelle. En effet, dans le cadre de ce travail, l'application a été utilisée et testée uniquement dans un contexte de développement en local.

Une étape nécessaire pour une amélioration future de l'application serait de diffuser l'application en ligne sur un serveur, puis de procéder à une phase de test utilisateur-ice. Cette phase serait primordiale afin de réaliser un état des lieux du fonctionnement de l'application dans un environnement réel. De plus, elle permettrait d'aiguiller les modifications nécessaires bénéfiques pour l'utilisateur-ice au niveau de l'interactivité et de la personnalisation des paramètres dans l'optique de mettre en place une application la plus intuitive et facile d'utilisation. Cette étape offrirait également l'opportunité de récolter un retour d'expérience sur la pertinence des différentes informations à disposition sur le trajet et sur la facilité de compréhension de la qualité cyclable tout en la confrontant possiblement à la perception réelle des cyclistes. Enfin, il serait aussi possible de mettre en évidence de potentiels bugs, non rencontrés jusqu'à maintenant et non anticipés, par exemple à cause d'une suite de manipulations qui bloquerait l'application.

Le fonctionnement côté serveur et notamment l'algorithme de routing est satisfaisant puisque l'application fonctionne, mais il existe plusieurs pistes d'améliorations et de réflexions. Les différents

paramètres personnalisables pour l'algorithme de routing donnent des résultats convenables de manière générale comme présentés dans la section ci-dessus. Lorsque les intersections ne sont pas prises en compte, l'algorithme propose des itinéraires qui semblent intuitivement suivre des routes qui maximisent la qualité cyclable. Cependant, il faut noter que certains trajets proposés sont particuliers comme celui de la Figure 49 qui longe l'Avenue du Mont-d'Or, problématique au niveau des conditions de confort et de sécurité. Or, il semble exister un trajet alternatif avec une meilleure qualité cyclable puisque l'intégration des intersections à l'algorithme propose un chemin différent qui ne semble pas entraîner un grand détour. Par conséquent, un élément important autour du développement de l'application réside dans l'analyse profonde du fonctionnement de l'algorithme. Explorer le comportement de l'algorithme et ses résultats face à la variation des coûts associés aux liens et aux intersections est une étape primordiale pour comprendre à partir de quel moment un trajet est préféré à un autre trajet. Une telle analyse sort du cadre de ce travail, mais elle serait nécessaire pour faire un bilan sur la forme des algorithmes utilisés et de réfléchir sur les modifications nécessaires pour améliorer leurs rapidité, surtout pour l'algorithme intégrant les intersections. Ce dernier est une première version fonctionnelle, mais actuellement le calcul d'un trajet prend entre 20 et 60 secondes. Pour une utilisation réelle, ce laps de temps est trop grand ; les utilisateur-ice-s finiraient probablement par quitter la page. Dans cette perspective, le passage de l'algorithme de Dijkstra à l'algorithme A-star pourrait être une première piste intéressante. Enfin pour l'algorithme, il serait nécessaire de questionner l'utilisation de la distance perçue comme poids du réseau afin de maximiser la qualité cyclable d'un trajet.

L'outil de recherche d'adresse actuel repose sur le package Javascript leaflet-goesearch qui fonctionne avec le moteur de recherche d'OpenStreetMap Nominatim. Ce dernier est utilisable librement, mais il existe une limite d'une requête par seconde, au-dessus de laquelle le service est bloqué et devient payant pour être utilisé. Pour une utilisation réelle, il faudrait anticiper ce problème de limite de requête. Enfin, un élément qui n'a pas été mis en place dans ce travail, par manque de temps et de connaissances détaillées, concerne la mise en place d'une base de données pour les différentes données du réseau cyclable. Cet élément intègre également la question de la maintenance d'une telle base de données et de la mise à jour des données, notamment pour la mise en place de nouveaux aménagements cyclables ou pour la correction de données potentiellement erronées. Il est aussi envisageable de fonctionner comme OSM en permettant aux utilisateur-ice-s de modifier les données du réseau cyclable ; ceci poserait alors la question de savoir qui approuverait ou non ces propositions.

6. Conclusion

La mobilité quotidienne est encore largement dominée par le trafic motorisé. Or, ce dernier possède de nombreuses conséquences négatives ; très forte pollution engendrée, très large appropriation de l'espace dans les milieux urbains, manque d'activité physique, coûts de maintenance élevés (Banister & Woodcock, 2013; Bierlaire et al., 2017). La transformation de la mobilité quotidienne est primordiale, et se fait pressante dans le contexte de réchauffement climatique (Rérat et al., 2019). La place du vélo dans ce changement de paradigme pourrait se révéler particulièrement essentielle. En effet, l'utilisation de la petite reine est caractérisée par de nombreux avantages en miroir des problèmes de la mobilité motorisée : une absence de pollution, une économie d'espace, une amélioration de la santé, ou encore un faible coût des infrastructures (Rérat et al., 2019). Face à ce potentiel d'utilisation du vélo, de nombreuses villes se décident à encourager la pratique du vélo ; cette stratégie passe principalement par le développement d'un réseau cyclable continu, sûr, et confortable (Héran, 2014; Rérat et al., 2019). Cependant, il ne faut pas négliger les autres dimensions du système-vélo pour avoir un cadre accueillant quant à la pratique du vélo (Héran, 2018). Un des éléments importants concerne la communication et la diffusion d'informations autour du réseau cyclable existant et des opportunités offertes au niveau de la sécurité et du confort. Ces informations sont nécessaires afin de convaincre de potentiel·le·s utilisateur·ice·s dont le niveau de confort et les conditions de sécurité tout au long du trajet sont des facteurs déterminants dans leur choix de mobilité (Betz et al., 1993; Ehrgott et al., 2012; Hochmair & Rinner, 2005).

Le présent travail s'est concentré sur deux axes autour du système-vélo pour la ville de Lausanne. Le premier s'est focalisé sur une évaluation de la qualité du réseau cyclable actuel. Des évaluations similaires précédemment réalisées ainsi que certaines recommandations fédérales ont été considérées pour définir un cadre d'évaluation pour la qualité cyclable des rues et la qualité cyclable des intersections (Grigore et al., 2019; Krenn et al., 2015; OFROU, 2008, 2021; Winters et al., 2013). Les méthodes proposées prennent en compte différents aspects du potentiel d'accueil du territoire relevés comme important pour le confort et la sécurité des cyclistes (Héran, 2014; Rérat et al., 2019). Pour les rues, il s'agit de la pente, de la présence d'infrastructures cyclables en interaction avec la charge de trafic motorisé et la limite de vitesse, de la présence de poids lourds et de l'aspect agréable de l'environnement. Quant aux intersections, la qualité cyclable est définie en fonction du type d'intersections : avec et sans signalisation lumineuse ou petits et grands giratoires. Une distinction est aussi réalisée selon le mouvement réalisé pour traverser l'intersection : tourner à droite, à gauche ou aller tout droit. À cela s'ajoute la considération de certaines caractéristiques dangereuses comme la charge de trafic motorisé, le nombre de voies de circulation et les aménagements cyclables mis en place. Cette méthodologie en deux temps permet une évaluation complète de la qualité cyclable sur l'ensemble du territoire de la ville de Lausanne.

Près de 50 % du réseau cyclable de la ville possède une qualité cyclable négative pour les rues. Cette dernière s'explique en partie par des aménagements cyclables encore trop lacunaires et discontinus malgré les récents efforts de la ville de Lausanne pour développer un réseau cyclable sûr et continu (SMAEP, 2021). De plus, cette mauvaise qualité cyclable se retrouve sur de longs tronçons qui peuvent rendre la pratique du vélo très désagréable et démotiver de potentiel·le·s utilisateur·ice·s (Héran, 2014). Une partie de ce résultat est imputable au contexte topographique de la ville de Lausanne qui

possède de très fortes déclivités sur l'axe nord-sud. La qualité cyclable de certaines rues est largement améliorable puisqu'une partie ne possède pas encore d'aménagements cyclables ; ces deux éléments négatifs se complètent pour entraîner une perception très négative et un manque de sécurité. En outre, le présent travail permet de révéler les lacunes de la bande cyclable qui, même si elle améliore la sécurité, ne permet pas de contrebalancer entièrement les caractéristiques négatives que sont une vitesse élevée et une charge de trafic importante. Or, c'est la bande cyclable qui est l'aménagement le plus présent pour la ville de Lausanne, surtout sur les principaux axes routiers traversant la ville. Dans une perspective d'amélioration significative du réseau cyclable, au niveau de sa sécurité et de son caractère direct, la mise en place des bandes cyclables doit être accompagnée par d'autres mesures ambitieuses. Deux mesures nécessaires et fortes seraient la limitation de trafic traversant la ville de Lausanne et l'abaissement de la vitesse à 30 km/h. Une autre possibilité serait de transformer ces axes routiers pour mettre en place des pistes cyclables, par exemple en reprenant et réaménageant l'espace occupé par les stationnements du trafic individuel dans le milieu urbain ou en réduisant le nombre de voies de circulation pour les véhicules motorisés.

Pour la qualité cyclable des intersections, ce sont les grands giratoires et certaines intersections avec feux de signalisation qui posent le plus de problèmes pour les mouvements « Gauche » et « Tout droit ». Ce constat s'explique par le fait que ces types d'intersections ont été mis en place pour gérer un flux de trafic motorisé important, le plus souvent sans considération pour le trafic cycliste (OFROU, 2021). Les giratoires sont les intersections les plus problématiques, car il est impossible de mettre en place un aménagement cyclable à l'intérieur d'un giratoire. Il est nécessaire de réfléchir à des mesures pour éviter ces grands giratoires qui se trouvent souvent sur certains tronçons essentiels de la ville. Pour les intersections avec signalisation lumineuse, la grande proportion de carrefours avec plusieurs voies de circulation du trafic motorisé péjore le sentiment de sécurité et de confort des cyclistes. La présence de sas vélo, de tourner à gauche indirect et la possibilité de tourner à droite au feu rouge améliore les conditions de traversée d'une intersection. Cependant, ces aménagements ne sont pas toujours facilement accessibles : sur les 165 sas vélos recensés, seulement la moitié est facilement accessible. Il est primordial d'améliorer cette situation pour que cet aménagement puisse déployer tout son potentiel. En outre, encore 60 % des mouvements aux intersections avec signalisation ne possèdent aucun aménagement cyclable, ce qui influe négativement sur les sentiments de sécurité et de confort pour les cyclistes, sentiment renforcé pour des utilisateur·ice·s peu expérimenté·e·s (Rérat et al., 2019). La méthodologie développée pour l'évaluation de la qualité cyclable permet de définir un cadre intéressant et apporte certains points novateurs par rapport aux différentes études similaires réalisées en continuant le travail de Grigore et al. (2019). C'est notamment le cas de la méthodologie pour les intersections qui permet de faire une distinction essentielle pour les giratoires.

Le deuxième axe de ce travail s'est construit à partir de l'évaluation de la qualité cyclable de la ville de Lausanne pour développer une application de routing qui met l'accent sur la qualité cyclable des trajets. L'objectif était de répondre au besoin de communication et de diffusion d'informations sur le réseau cyclable actuel et des opportunités de trajets existantes pour améliorer les sentiments de confort et de sécurité lors de la pratique du vélo. Cette application se voulait être un outil pour essayer de convaincre une partie des personnes intéressées par la pratique du vélo, mais réticentes à cause du manque de sécurité et de confort le long des routes. De plus, cet outil pourrait également se révéler

utile pour des cyclistes déjà régulier·ère·s en pouvant améliorer leur expérience pour les trajets effectués. L'application développée est fonctionnelle et répond, en partie, à l'objectif du deuxième axe de ce travail. L'application prend la forme d'une page web contenant une carte Leaflet sur laquelle l'utilisateur·trice peut définir les points de départ et de destination de différentes manières. L'application détermine le trajet qui maximise la qualité cyclable entre ces deux points et l'affiche sur la carte avec différentes informations à disposition lorsqu'on se balade avec la souris sur le trajet. L'utilisateur·ice peut également personnaliser certaines variables à intégrer à l'algorithme, à savoir la pente et les intersections. Pour tenir compte de ces dernières, il a été nécessaire de développer un nouvel algorithme qui est une modification de l'algorithme de Dijkstra. Etant donné que l'application a été utilisée et testée jusqu'à présent dans un contexte de développement, elle n'est qu'une 1^{ère} étape et n'est pas encore diffusable à large échelle dans sa version actuelle. Elle pourrait néanmoins être reprise et adaptée relativement facilement pour une utilisation et une diffusion à large échelle, et ainsi répondre pleinement à l'objectif du deuxième axe.

Bien entendu, certains choix méthodologiques ont pour conséquence des limites pour ce travail et des perspectives d'améliorations et de recherches approfondies. Concernant l'application développée, dans une perspective de diffusion à large échelle, il serait nécessaire de la mettre en ligne sur un serveur, puis de réaliser un test utilisateur·trice. Cette phase servirait à déterminer les évolutions et modifications nécessaires à apporter pour répondre aux besoins des utilisateur·trice·s, notamment au niveau des interactivités nécessaires et du niveau de personnalisation souhaité. En plus de cela, l'aspect serveur de l'application devrait aussi être modifié afin de pouvoir fonctionner face à une utilisation plus soutenue, par exemple en améliorant la rapidité de l'algorithme utilisé lors de la prise en compte des intersections. Ce nouvel algorithme développé demande également une analyse plus approfondie de son fonctionnement. Il serait intéressant d'explorer l'évolution des trajets proposés en fonction de la variation des coûts associés aux liens et aux intersections. De plus, comparer les trajets obtenus au ressenti des cyclistes quant au niveau de sécurité et de confort serait précieux pour voir si les chemins trouvés correspondent aux attentes des cyclistes. Pour l'évaluation de la qualité cyclable des rues, il serait intéressant de réfléchir à une meilleure prise en compte de l'interaction entre la pente, les aménagements cyclables et le trafic. En effet, une forte pente en montée entraîne un plus grand différentiel de vitesse entre les vélos et les véhicules motorisés. Ainsi, la présence d'un aménagement cyclable entraînant une séparation totale du trafic a pour conséquence une meilleure perception que si un·e cycliste se retrouve à proximité du trafic. Or, cette distinction ne ressort pas clairement avec la méthodologie appliquée pour ce travail. Il serait envisageable d'intégrer la pente directement dans le coût associé aux infrastructures cyclables, tout en conservant le coût associé à la topographie. En outre, d'autres variables, laissées de côté dans le cadre de ce travail, pourraient être intégrées afin d'affiner l'évaluation de la qualité cyclable. Par exemple, la présence de stationnements le long des rues ou une distinction des bandes cyclables selon leur largeur et celle de la voie de circulation pourraient être incluses. Ces éléments ont notamment été proposés et intégrés par Grigore et al. (2019).

7. Références

- Adams, T., & Aldred, R. (2020). Cycling Injury Risk in London : Impacts of Road Characteristics and Infrastructure. *Findings*. <https://doi.org/10.32866/001c.18226>
- Akar, G., & Clifton, K. J. (2009). *The influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on the decision to bike*. 18.
- Akgün, N., Dissanayake, D., Thorpe, N., & Bell, M. C. (2018). Cyclist casualty severity at roundabouts – To what extent do the geometric characteristics of roundabouts play a part? *Journal of Safety Research*, 67, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.09.004>
- Banister, D., & Woodcock, J. (2013). Moving Toward Sustainable Urban Transport. In J. Heymann & M. Barrera (Éds.), *Ensuring a Sustainable Future* (p. 135-160). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/med/9780199974702.003.0007>
- Bast, H., Dellling, D., Goldberg, A., Müller-Hannemann, M., Pajor, T., Sanders, P., Wagner, D., & Werneck, R. F. (2015). *Route Planning in Transportation Networks* (arXiv:1504.05140). arXiv. <http://arxiv.org/abs/1504.05140>
- Beauguitte, L. (2010). *Graphes, réseaux, réseaux sociaux : Vocabulaire et notation*. 8.
- Betz, J., DusTRUDE, J., & Walker, J. (1993). Intelligent Bicycle Routing in the United States. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, 7.
- Bierlaire, M., Kaufmann, V., & Rérat, P. (2017). *La mobilité en questions*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Boeing, G. (2017). OSMnx : New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Broach, J., Dill, J., & Gliebe, J. (2012). Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(10), 1730-1740. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.07.005>

- Buehler, R., & Dill, J. (2016). Bikeway Networks : A Review of Effects on Cycling. *Transport Reviews*, 36(1), 9-27. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069908>
- Carter, D. L., Hunter, W. W., Zegeer, C. V., Stewart, J. R., & Huang, H. (2007). Bicyclist Intersection Safety Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2031(1), 18-24. <https://doi.org/10.3141/2031-03>
- Cassingena Navone, E. (2020, septembre 28). *Dijkstra's Shortest Path Algorithm—A Detailed and Visual Introduction*. FreeCodeCamp.Org. <https://www.freecodecamp.org/news/dijkstras-shortest-path-algorithm-visual-introduction/>
- Cazorla, P. (2017). Cycling and public transportation sharing space : An option to increase cycling ridership. *MASKANA*, 8(2), 71-81. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.06>
- DGMR. (2021a). *Faciliter les déplacements à vélo, pour une mobilité multimodale durable—Fiches illustratives de mesures rapidement réalisable dans votre commune*. Direction Générale de la mobilité et des routes.
- DGMR. (2021b). *Stratégie cantonale de promotion du vélo—Horizon 2035*. Direction Générale de la mobilité et des routes.
- Dijkstra, E. W. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*. 269-271.
- Dill, J., Monsere, C. M., & McNeil, N. (2012). Evaluation of bike boxes at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.10.030>
- Ehrgott, M., Wang, J. Y. T., Raith, A., & van Houtte, C. (2012). A bi-objective cyclist route choice model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(4), 652-663. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.015>
- Ehrig-Page, J. C. (2020). Evaluating Methods for Downloading OpenStreetMap Data. *Cartographic Perspectives*, 95, 42-49. <https://doi.org/10.14714/CP95.1633>
- Gatersleben, B., & Appleton, K. M. (2007). Contemplating cycling to work : Attitudes and perceptions in different stages of change. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(4), 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.09.002>

- Geller, R. (2006). *Four Type of cyclists*. Portland Office of Transportation.
<http://www.portlandoregon.gov/transportation/article/264746>,
- Götschi, T., Castro, A., Deforth, M., Miranda-Moreno, L., & Zangenehpour, S. (2018). Towards a comprehensive safety evaluation of cycling infrastructure including objective and subjective measures. *Journal of Transport & Health*, 8, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.12.003>
- Götschi, T., Garrard, J., & Giles-Corti, B. (2016). Cycling as a Part of Daily Life : A Review of Health Perspectives. *Transport Reviews*, 36(1), 45-71.
<https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1057877>
- Grigore, E., Garrick, N., Fuhrer, R., & Axhausen, Ing. K. W. (2019). Bikeability in Basel. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673(6), 607-617.
<https://doi.org/10.1177/0361198119839982>
- Héran, F. (2014). *Le retour de la bicyclette : Une histoire des déplacements urbains en Europe, de 1817 à 2050*. La Découverte.
- Héran, F. (2018, mai 28). *Forum Vies Mobiles | Préparer la transition mobilière*.
<https://forumviesmobiles.org/dictionnaire/12437/systeme-velo>
- Hochmair, H. H., & Rinner, C. (2005). Investigating the Need for Eliminary Constraints in the User Interface of Bicycle Route Planners. In A. G. Cohn & D. M. Mark (Éds.), *Spatial Information Theory* (Vol. 3693, p. 49-66). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11556114_4
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*. 168.
- Javaid, M. A. (2013). Understanding Dijkstra Algorithm. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.2340905>
- Jensen, S. U. (2013). Safety Effects of Converting Intersections to Roundabouts. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2389(1), 22-29.
<https://doi.org/10.3141/2389-03>
- Kaufmann, V. (2014). *Retour sur la ville : Motilité et transformations urbaines*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

- Kellstedt, D. K., Spengler, J. O., Foster, M., Lee, C., & Maddock, J. E. (2021). A Scoping Review of Bikeability Assessment Methods. *Journal of Community Health, 46*(1), 211-224. <https://doi.org/10.1007/s10900-020-00846-4>
- Krenn, P. J., Oja, P., & Titze, S. (2015). Development of a Bikeability Index to Assess the Bicycle-Friendliness of Urban Environments. *Open Journal of Civil Engineering, 05*(04), 451-459. <https://doi.org/10.4236/ojce.2015.54045>
- Landis, B. W., Vattikuti, V. R., Ottenberg, R. M., Petritsch, T. A., Guttenplan, M., & Crider, L. B. (2003). Intersection Level of Service for the Bicycle Through Movement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1828*(1), 101-106. <https://doi.org/10.3141/1828-12>
- Liu, C., Tapani, A., Kristoffersson, I., Rydergren, C., & Jonsson, D. (2020). Development of a large-scale transport model with focus on cycling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 134*, 164-183. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.010>
- Lowry, M. B., Callister, D., Gresham, M., & Moore, B. (2012). Assessment of Communitywide Bikeability with Bicycle Level of Service. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2314*(1), 41-48. <https://doi.org/10.3141/2314-06>
- Madsen, T. K. O., & Lahrmann, H. (2017). Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 46*, 438-450. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.05.008>
- Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., & Axhausen, K. W. (2010). Route choice of cyclists in Zurich. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44*(9), 754-765. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.07.008>
- National Research Council (Éd.). (2010). *HCM 2010 : Highway capacity manual*. National Academy of Science.
- OFROU. (2008). *Conception d'itinéraires cyclables—Manuel*. Office fédéral des routes.

- OFROU. (2021). *Gestion des cycles aux carrefours—Manuel d’infrastructure*. Office fédéral des routes.
https://www.velokonferenz.ch/download/pictures/c8/44mj96hgkpbz7m5e6fot8wgnit2s46/hbi_gestion_des_cycles_aux_carrefours_f_220811.pdf
- OFS. (2022). *Mobilité et transport : Statistique de poches 2022*. Office fédéral de la Statistique.
- OMS. (2022, octobre 5). Activité physique. *Organisation mondiale de la Santé*.
<https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>
- OSM. (2023). *OpenStreetMap*. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/about>
- Pannozo, N. (2022, mai 25). *Prix Vélo Villes : Lausanne sur la bonne route, mais doit encore pédaler*.
PRO VELO Région Lausanne. https://www.pro-velo-lausanne.ch/prix_velo_villes_lausanne_sur_la_bonne_route_mais_doit_encore_pedaler
- Poudel, N., & Singleton, P. A. (2021). Bicycle safety at roundabouts : A systematic literature review. *Transport Reviews*, 41(5), 617-642. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1877207>
- Pritchard, R., Frøyen, Y., & Snizek, B. (2019). *Bicycle Level of Service for Route Choice—A GIS Evaluation of Four Existing Indicators with Empirical Data*. 19.
- Rérat, P., Giacomel, G., & Duro Martin, A. (2019). *Au travail à vélo... : La pratique utilitaire de la bicyclette en Suisse*.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems* (Fifth edition). Routledge.
- SECO. (2018a, janvier 17). *Présentation des quartiers*. Site officiel de la Ville de Lausanne.
<https://www.lausanne.ch/officiel/statistique/quartiers/presentation-des-quartiers.html>
- SECO. (2018b, juin 15). *Place économique*. Site officiel de la Ville de Lausanne.
<https://www.lausanne.ch/portrait/economie/place-economique.html>
- SECO. (2022). *Lausanne et les villes suisses—City Statistics 2022*. Service de l’économie de la ville de Lausanne - Office d’appui économique et statistique.
<https://issuu.com/villedelausanne/docs/lausanne-et-la-suisse-2021>
- Sener, I. N., Eluru, N., & Bhat, C. R. (2009). An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US. *Transportation*, 36(5), 511-539. <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9201-4>

- SMAEP. (2021). *Observatoire de la mobilité lausannoise*. Service de la mobilité et de l'aménagement des espaces publics.
- SMAEP. (2022a). *A vélo en ville*. Site officiel de la Ville de Lausanne. <https://www.lausanne.ch/vie-pratique/mobilite/mobilite-et-circulation/a-velo.html>
- SMAEP. (2022b). *Zones de rencontre (zones 20 km/h)*. Site officiel de la Ville de Lausanne. <https://www.lausanne.ch/vie-pratique/mobilite/mobilite-et-circulation/moderation-du-traffic/zones-rencontre.html>
- Statistique Vaud. (2017). *Numerus Hors-Série 2017—Mobilité et transport*. Canton de Vaud. https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/organisation/dfin/statvd/Dom_11/Publications/Numerus-HS-2017_MRMT.pdf
- Stefánsdóttir, H. (2014). *Urban routes and commuting bicyclists' aesthetic experiences*. 21.
- Su, J. G., Winters, M., Nunes, M., & Brauer, M. (2010). Designing a route planner to facilitate and promote cycling in Metro Vancouver, Canada. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(7), 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.015>
- Tieppo, R. (2018, juillet 27). *Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation · Rafael Tieppo*. https://rafatieppo.github.io/post/2018_07_27_idw2pyr/
- Winters, M., Brauer, M., Setton, E. M., & Teschke, K. (2013). Mapping bikeability : A spatial tool to support sustainable travel. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(5), 865-883. <https://doi.org/10.1068/b38185>