



# **Conception et développement d'une application de navigation pour le déplacement multimodal accessible des Personnes en fauteuil roulant**

**Mémoire**

**Mohamed Bahloul**

**Maîtrise en sciences géomatiques - avec mémoire**  
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

**Conception et développement d'une application de navigation pour le déplacement multimodal accessible des Personnes en fauteuil roulant**

**Mémoire**

Mohamed Bahloul

Sous la direction de :

Mir Abolfazl Mostafavi, Directeur de recherche  
Normand Boucher, Codirecteur de recherche

## Résumé

La mobilité des personnes en fauteuil roulant (PFR) joue un rôle crucial pour leur participation sociale. Cependant, l'accès au service de transport en commun présente un défi de taille pour ces personnes en raison de divers obstacles physiques et sociaux qu'elles peuvent rencontrer lors de leurs déplacements en utilisant le transport en commun comme le manque des parcours ou arrêts de bus accessibles.

Au cours des dernières années, la mise au point de technologies d'aide technique s'est développée progressivement pour permettre aux PFR d'améliorer leur qualité de vie. En particulier, ces technologies offrent une variété de fonctionnalités et de solutions qui permettent à ces personnes de surmonter divers obstacles qui réduisent leur déplacement et leur inclusion sociale. De ce fait, de nombreux projets ont été créés, comme Streetco ou Evelity en France. Au Canada, le projet multidisciplinaire MobiliSIG a été lancé en 2013. Ce dernier vise à concevoir et développer des technologies géospatiales de navigation selon les principes de la conception cognitive pour assister les PFR dans leurs déplacements quotidiens et leur accès à l'environnement.

Ce projet vise à offrir un itinéraire personnalisé et adapté au profil des utilisateurs pour offrir un transport multimodal accessible. Cependant, ce service peut connaître divers enjeux étant donné l'accessibilité à tous les parcours et arrêts de bus, l'intégration de la conception sans obstacle selon les principes de conception universelle<sup>1</sup>.

Dans ce projet, nous avons proposé une approche basée sur la personnalisation de l'itinéraire tout en identifiant les facteurs socio-environnementaux affectant l'accessibilité du transport en commun. Cette approche permet de planifier un déplacement multimodal adapté en appuyant sur un algorithme de routage qui prend en considération l'indice de l'accessibilité des itinéraires. Nous avons conçu et développé de nouvelles fonctionnalités pour une application web (MobiliSIG) permettant la planification d'itinéraire multimodal personnalisé selon les profils des personnes en fauteuil roulant. Finalement quelques scénarios ont été testés pour des fins de validation de l'application dans la ville de Québec.

---

<sup>1</sup> <https://universaldesign.ie/What-is-Universal-Design/The-7-Principles/7-Principals-.pdf>

## Abstract

Mobility plays a crucial role in the social participation of Manual wheelchair users (MWU). Among others, access to public transit service presents a significant challenge for these individuals due to various physical and social barriers they may encounter while travelling by using public transit such as lack of accessible transit routes or stops.

Over the past few years, the development of assistive navigation technologies has been gradually developed to enable MWU to improve their quality of life. In particular, these technologies offer a variety of features and solutions that allow these individuals to overcome various barriers that limit their mobility and social participation. As a result, many projects have been created, such as Streetco or Evelity in France. In Canada, the multi-disciplinary MobiliSIG project was launched in 2013. It aims to design and develop a geospatial navigation technology based on the principles of cognitive design to assist MWU in their daily travel and access to the environment.

This project aims to offer a personalized route adapted to the profile of users to offer accessible multimodal transport. However, this service can know various issues given the improvement of the accessibility of stops, the accessibility to all routes and bus stops to people in wheelchairs, Barrier-free design guide tracking in all new projects according to universal design principles<sup>2</sup>.

In this project, we proposed an approach based on the personalization of the route while identifying the environmental factors affecting the accessibility of public transport. This approach makes it possible to plan a suitable multimodal trip using a routing algorithm that takes into account the route accessibility index. We have designed and developed new functionalities for a web application (MobiliSIG) allowing multimodal route planning customized according to the profiles of people in wheelchairs. Finally, some scenarios were tested for validation of the application in Quebec City.

---

<sup>2</sup> <https://universaldesign.ie/What-is-Universal-Design/The-7-Principles/7-Principals-.pdf>

# Table des matières

Résumé .....	iii
Table des matières .....	v
Liste des tableaux .....	viii
Liste des figures.....	ix
Remerciements.....	xi
Introduction.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique .....	3
1.2.1 Facteurs affectant l'utilisation de transport en commun pour les personnes ayant des incapacités physiques .....	3
1.2.2 Les enjeux de déplacement multimodal .....	6
1.2.3 Limites des méthodes et outils d'aide à la navigation existants pour les personnes en fauteuil roulant.....	6
1.3 Objectifs.....	9
1.3.1 Objectif général.....	9
1.3.2 Objectifs spécifiques .....	9
1.4 Méthodologie .....	9
1.5 Organisation du mémoire .....	14
Chapitre 2 : Revue Littérature.....	16
2.1 Notions de base et concepts .....	16
2.1.1 Modèle de développement humain – Processus de production du handicap .....	16
2.1.2 Handicap et participation sociale .....	18
2.1.3 Accessibilité .....	19
2.1.4 Multimodalité et intermodalité de déplacement.....	19
2.1.5 Notion de graphe et algorithme du plus court chemin.....	20
2.2 Outils de mesure de l'environnement utilisant les facteurs environnementaux et perceptions des personnes .....	21
2.3 Etat de situation sur des méthodes d'évaluation d'accessibilité de déplacement pour personnes en Fauteuil roulant .....	24
2.4 Applications et outils géospatiaux intégrant les algorithmes de routages.....	26
2.5 Conclusion.....	31
Chapitre 3 : Identification des facteurs environnementaux affectant l'accessibilité dans un contexte de déplacement multimodal .....	32

3.1	Facteurs affectant l'accessibilité pour un déplacement multimodal .....	32
3.1.1	Recherche des facteurs affectant l'accessibilité des chemins piétonniers, zones d'arrêts et accès à bord de transport en commun .....	33
I.	Cheminement piétonnier .....	33
II.	Les zones d'arrêts.....	36
III.	Manœuvre de montée/descente et à bord de l'autobus.....	39
3.1.2	Classification des facteurs selon la hiérarchie de modèle MDH-PPH et méthodologie de sélection de la liste finale des facteurs à considérer .....	41
3.2	Conclusion.....	44
<b>Chapitre 4 : Estimation de l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal et développement de l'algorithme de routage .....</b>		<b>45</b>
4.1	Profil des utilisateurs selon les perceptions et la confiance.....	45
4.2	Addition des niveaux de confiance pour se déplacer en fonction des paramètres établis pour un segment de trajet .....	48
4.3	L'approche de la logique floue pour le calcul de l'indice d'accessibilité (Fuzzy logic).....	48
4.4	Développement de l'algorithme de routage.....	52
4.4.1	Trajet en déplacement multimodal.....	53
4.4.2	Personnalisation de l'itinéraire en fonction de profil de l'utilisateur .....	54
4.4.3	Intégration des valeurs des couts avec l'algorithme pgRouting.....	55
4.5	Conclusion.....	58
<b>Chapitre 5 : Implémentations et résultats .....</b>		<b>59</b>
5.1	Architecture du système proposé .....	59
5.2	Préparation des données et conception de réseau multimodal .....	61
5.3	Importation des données dans la base de données de MOBILISIG .....	66
5.4	Création de la Topologie de réseau de graphe dans pgRouting .....	67
5.5	Génération des sens de direction des parcours de Bus.....	67
5.6	Implémentation de l'algorithme de routage avec des requêtes SQL en pgRouting .....	69
5.7	Résultats et Tests .....	70
5.7.1	Interfaces de notre application web.....	70
5.7.2	Cas d'étude dans la ville de Québec .....	72
5.8	Conclusion.....	86
Conclusion.....		87
<b>Retour sur les objectifs de recherche : .....</b>		<b>87</b>
Bilan des étapes de notre recherche et discussions : .....		88

<b>Travaux futurs et perspectives :</b> .....	89
Bibliographies .....	91

## Liste des tableaux

Tableau 1: Utilisation régulière des transports en commun selon le type d'incapacité, population de 15 ans et plus avec incapacité, Québec .....	4
Tableau 2 : population de 15 ans et plus avec incapacité éprouvant des difficultés à utiliser ces services en raison de leur état, Québec.....	5
Tableau 3 : Quelques propriétés permanentes et temporelles choisies comme des facteurs environnementaux dans le projet MobiliSIG.....	24
Tableau 4 : Limites des outils existants pour le déplacement multimodal des PFR .....	30
Tableau 5: Certains facteurs pour améliorer l'accessibilité aux services de transports en commun pour les personnes à déficiences motrices selon le guide de (RUTA,2010) .....	38
Tableau 6 : Classification des facteurs environnementaux, personnels identifiés dans notre recherche qui affectent l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal. ....	42
Tableau 7 : Questionnaire à ajouter dans l'interface du profil d'utilisateur de MobiliSIG pour calculer l'accessibilité d'itinéraire en déplacement multimodal .....	44
Tableau 8 : Tableau de transformation des valeurs de confiances en niveaux de confiances .....	50
Tableau 9 : Tableau résumant les variables utilisées et leurs valeurs possibles .....	51
Tableau 10 : Tableau résumant les règles du système flous IF-Then.....	52
Tableau 11: Fonctions attribuées aux divers segments de réseau de déplacement .....	54
Tableau 12: Comportement de l'algorithme en fonction des niveaux d'accessibilité et type de segment de réseau de déplacement .....	55

## Liste des figures

Figure 1 : Organigramme de la méthodologie.....	14
Figure 2 : Modèle MDH-PPH (P Fougeyrollas et al., 1998).....	18
Figure 3 : Recherche de plus court chemin, algorithme Dijkstra .....	21
Figure 4 : Exemple d’outil de mesure de l’accessibilité de l’environnement d’un milieu piétonnier dans le projet MEA .....	22
Figure 5 : Exemple de mesures nécessaire pour l’analyse de l’accessibilité de l’environnement d’un milieu piétonnier.....	34
Figure 6 : Exemple de mesures nécessaire pour l’analyse de l’accessibilité de l’environnement d’un milieu piétonnier.....	35
Figure 7 : Exemple de déploiement de la rampe d’accès.....	41
Figure 8 : Méthodologie adoptée pour le choix de la liste finale des facteurs.....	43
Figure 9 : Forme de questionnaire de (WheelCon, 2011).....	46
Figure 10 : Interface profil utilisateur dans l’application MobiliSIG .....	47
Figure 11 : Format Well-known Text et représentation géométrique d'une Linestring.....	57
Figure 12 : Diagramme de Flux de la méthodologie de développement de l’algorithme de routage .....	58
Figure 13 : Architecture 3 tiers pour un système SIGWEB .....	60
Figure 14 : Architecture de système .....	61
Figure 15 : Diagramme de processus de préparation de réseau multimodal.....	62
Figure 16 : Données GTFS .....	63
Figure 17 : Réseau multimodal résultant.....	64
Figure 18 : Exemple de table attributaire pour un segment de trottoir .....	64
Figure 19 : Exemple de table attributaire d'un segment de type transfert dans la base de données... ..	65
Figure 20 : Résultat plus court chemin de l’outil Network Analyst (ArcGIS) .....	66
Figure 21 : Modèle de données nœud-arc bidirectionnel dans les bases de données relationnelles.. ..	68
Figure 22: Fonction de transformation des valeurs de confiance en niveaux d'accessibilité.....	69
Figure 23 : Interface du profil utilisateur .....	71
Figure 24 : Interface de planification d’un trajet multimodal .....	71
Figure 25 : Question 1 dans Profil utilisateur.....	72
Figure 26 : Question 18 dans Profil utilisateur.....	73
Figure 27 : Trajet planifié pour le scénario 1 .....	74
Figure 28 : Trajet obtenu par Google Maps.....	75
Figure 29 : Niveau d'accessibilité très faible "VL" au niveau de l'arrêt de l'université Laval.....	76
Figure 30 : Niveau d'accessibilité faible pour l'arrêt de l'université Laval.....	77
Figure 31 : Niveau d'accessibilité très faible à cause des pentes >5% .....	77
Figure 32 : La nouvelle planification avec l'algorithme de routage adapté avec le profil de l'utilisateur .....	78
Figure 33 : Zoom Avant sur l'itinéraire près l'arrêt de l'université Laval .....	79
Figure 34 : Représentation du nouvel itinéraire près de point d'arrivée accessible selon le profil de l'utilisateur .....	79
Figure 35 : Interface profil utilisateur pour scénario 2.....	80
Figure 36 : Trajet de planification pour scénario 2.....	81
Figure 37: Trajet planifié sur Google Maps.....	82

Figure 38: Niveau d'accessibilité très faible dans le transfert pour le scénario 2 .....	82
Figure 39 : Niveau d'accessibilité faible au niveau de l'arrêt de M. Civilisation au niveau de serveur sous forme de GeoJson .....	83
Figure 40: Faible niveau d'accessibilité dans la zone d'arrêt de musée de civilisation pour cet utilisateur dans ce scénario.....	84
Figure 41 : Niveau d'accessibilité faible au niveau de l'arrêt M. Civilisation décrit en format GeoJson.....	85
Figure 42 : Résultat du nouvel itinéraire accessible selon le profil utilisateur .....	86

# Remerciements

J'avais envie d'adresser mes sincères remerciements à ceux qui ont contribué à l'élaboration de mon mémoire. Je voudrais tout d'abord exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de maîtrise, le professeur Mir Abolfazl Mostafavi, pour m'avoir impliqué dans le projet MobiliSIG, d'assurer le soutien scientifique et financier pour réussir mon projet, pour tous ses conseils et encouragements qu'il m'a offerts tout au long de cette recherche. C'est un véritable privilège d'avoir pu bénéficier de son immense expérience en recherche, de la qualité de sa supervision ainsi que de son appui constant. Je suis également reconnaissant à mon codirecteur le docteur Normand Boucher pour ses précieux conseils et pour m'avoir encadrée et orientée. Je voudrais adresser aussi toute ma gratitude au professionnel de recherche Patrick Coayla Morales pour sa collaboration, sa disponibilité et son soutien technique durant mes travaux. J'adresse aussi mes remerciements au Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie de Québec, Fondation ELAN pour le financement du projet MobiliSIG et les partenaires du projet à savoir Réseau de Transport de la capitale (RTC), la ville de Québec pour leur soutien et leur contribution, en données et en temps dans la réalisation de ces travaux sans oublier l'Université Laval pour m'avoir octroyé la bourse d'excellence qui m'a soutenu financièrement dans mon projet. Une mention spéciale revient à tout le personnel que j'ai contacté au sein du département des sciences géomatiques et au centre de recherche en données et intelligence géospatiale (CRDIG), auprès duquel j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'assistance et l'aide dont j'ai besoin. Finalement, je tiens à remercier chaleureusement ma famille pour leur amour et leur soutien moral constant durant mon cursus universitaire.

# Introduction

## 1.1 Mise en contexte

La participation sociale des personnes en situation de handicap représente un enjeu majeur pour la société. Selon une enquête de Statistique Canada en 2017 plus de 2.7 millions canadiens sont affectés par une incapacité liée à la mobilité<sup>3</sup>. Seulement dans la province de Québec, on compte plus de 125 000 personnes à mobilité réduite devront se déplacer avec un fauteuil roulant (OPHQ, 2019). Pour une grande majorité de ces personnes, la capacité à se déplacer de manière autonome est nécessaire à leurs activités journalières ainsi qu'à la réalisation de leurs engagements sociaux. Par contre, la mobilité de ces personnes est affectée par divers obstacles des environnements physique et social.

Afin d'offrir un outil d'aide à la navigation adaptée pour des personnes en situation de handicap, des scientifiques provenant des domaines de la santé/réadaptation et de la géomatique se sont regroupés dans un projet multidisciplinaire intitulé MobiliSIG. Ce projet vise le développement d'une solution technologique multimodale d'assistance à la mobilité pour des personnes à mobilité réduite. Cet outil permet la cartographie de l'accessibilité du territoire urbain et propose des itinéraires accessibles en fonction du profil des utilisateurs. La présente recherche vient pour renforcer les efforts des travaux précédents dans le projet MobiliSIG afin d'étendre les fonctionnalités offertes et de viser une planification en plus qu'un mode de déplacement.

Puisque le déplacement multimodal améliore l'inclusion sociale, la satisfaction du besoin humain et le respect des droits universels de l'homme dont le déplacement est compté parmi ces droits, nous visons à offrir donc un outil de planification en déplacement multimodal accessible pour les personnes en fauteuil roulant.

La mobilité des personnes en situation de handicap et particulièrement les personnes à mobilités réduites utilisatrices de fauteuil roulant a été largement étudiée afin d'améliorer leur participation sociale (Fougeyrollas et al., 1998). Pour mieux cibler ces personnes, nous distinguons les déficiences de mobilités qui sont définies des limitations motrices dont quelconque atteinte à la mobilité, à la capacité d'exécuter manuellement ou à l'équilibre

---

<sup>3</sup> <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/201203/dq201203a-fra.htm>

d'une personne<sup>4</sup>. En effet, ces limitations sont manifestées dans diverses aptitudes dont on peut citer :

- Difficulté à se déplacer ou à se transférer (ex. : monter dans les moyens de transport)
- Maintien difficile de la posture debout, assise, etc.
- Action limitée sur le monde extérieur (ex. : difficulté à atteindre un bouton d'appel)
- Mouvements réflexes ralentis

C'est au début des années soixante-dix que la problématique de l'accessibilité des transports collectifs pour les personnes éprouvant des incapacités liées aux déplacements commence à être prise en considération par les gouvernements (OPHQ, 2018). Offrir l'accès au transport en commun à tous permet, au niveau collectif, un développement économique et social plus dynamique et non discriminatoire.

Afin de répondre aux exigences des lois de volet mobilité réduite des programmes (fédéral ou provincial) en 1995 qui permettront de rendre accessible le transport en commun, le Québec déploie de nombreux efforts, notamment en recherche technologique tout en continuant à l'élaboration de programmes, de normes et de lignes directrices en matière de transport accessible (OPHQ, 2018).

Pour que les personnes ayant des limitations liées aux déplacements puissent vivre de manière autonome et participer pleinement à tous les aspects de la vie quotidienne, elles doivent avoir accès sur un pied d'égalité à l'environnement physique, aux infrastructures de transport, aux lieux publics, etc. En effet, pour pouvoir se déplacer d'un point A vers un point B, les personnes se déplaçant en fauteuil roulant peuvent parcourir divers chemins et itinéraires composés de réseau piétonnier, les transports communs, les traverses piétonnières, etc. Pour ce faire, il peut y avoir plusieurs moyens de déplacement possibles tels que les Métrobus, les taxis, les autobus. Cependant, le déplacement multimodal ou déplacement combiné désigne un mode de déplacement consistant à acheminer des personnes d'une destination à une autre en empruntant au moins deux modes de déplacement différents successifs. Il s'agit, par exemple, de se déplacer d'un lieu à un autre en empruntant successivement le Train et le Métrobus. Cet acheminement est nécessaire surtout pour les longs trajets et pour se rendre à la destination rapidement.

---

<sup>4</sup> <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2775-accessibilite-universelle-conception-environnements.pdf>

De ce fait, le déplacement multimodal accessible et adapté pour les personnes utilisatrices des fauteuils roulants est fondamental pour leur déplacement et leur participation sociale. Pour planifier un tel Déplacement, plusieurs systèmes d'aide à la navigation tels GoogleMaps, HereWeGo et Streetco qui visent à assister les gens dans leurs déplacements et leur accès à l'environnement existent de nos jours. Cependant, ces systèmes ont certaines limites soit par rapport à la personnalisation des trajets selon le profil de l'utilisateur soit par le manque de déplacement multimodal accessible. Comme à la ville de Québec nous trouvons que certains arrêts de bus et parcours ne sont pas accessibles et Google Maps est incapable de planifier un trajet multimodal accessible c'est-à-dire en guidant la personne en fauteuil roulant à choisir l'arrêt accessible le plus proche de lui et un parcours de bus accessible. Les systèmes de navigation existants sont surtout compatibles avec les besoins des personnes n'ayant pas des déficiences de mobilité dont la planification de l'itinéraire ne prend pas en considération l'accessibilité des parcours et/ou les arrêts.

L'accessibilité aux transports en commun, est parmi les 17 objectifs pour le développement durable des pays, ceci montre l'importance du présent projet qui vise spécifiquement l'accessibilité de déplacement notamment dans les transports en commun pour les personnes utilisatrice de fauteuil roulant manuel. En effet, l'indicateur 11.2 de l'objectif 11 présente l'accès facile aux transports en commun. Cet indicateur encourage les pays qui suivent ces objectifs à assurer l'accès à des systèmes de transport sûrs, abordables, accessibles et durables pour tous, en améliorant la sécurité routière, en développant les transports publics, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes, les enfants, les personnes handicapées et les personnes âgées et ce d'ici à 2030<sup>5</sup>.

## 1.2 Problématique

### 1.2.1 Facteurs affectant l'utilisation de transport en commun pour les personnes ayant des incapacités physiques

L'accès aux services de transport public pour les personnes ayant des incapacités physiques ou en perte d'autonomie liée à la mobilité utilisant les fauteuils roulants constitue une problématique majeure. En effet, 2.7 millions de Canadiens (9.6%) âgés de 15 ans et plus ont

---

<sup>5</sup> <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210582810c013>

une capacité liée à la mobilité, 540 000 restent à la maison et 19.7 % d’eux disent que c’est en raison d’un manque de transport public (Statistique Canada, 2017). C’est pour cela, des organismes publics et privés, des milieux de recherche et associatifs ont augmenté les demandes pour avoir une infrastructure piétonnière et de transport qui répond aux règles des processus et concepts établies par différents recherches et guides.

Une recherche élaborée par Institut de statistiques de Québec sur la nature des limitations fonctionnelles relative aux déplacements divisés qui nous a permis de classier en 6 catégories, soit auditive et parole, intellectuelle, psychique, troubles envahissants du développement et autisme, motrice et visuelle (voir Tableau 1). Cette classification est par rapport aux personnes ayant ces incapacités (Institut de la statistique du Québec, 2015).

Limitations	Ayant ce type d’incapacité % qui utilisent le transport en commun	N’ayant pas ce type d’incapacité % qui utilisent le transport en commun
Vision	15,8	18,4
Audition	16,1	18,5
Mobilité	13,5	23,9
Flexibilité	12,9	23,6
Dextérité	14,6	19,0
Douleur	17,1	19,8
Apprentissage	22,5	17,2
Développement	21,0	17,9
Psychologique	22,7	16,6
Mémoire	25,6	17,1

Tableau 1: Utilisation régulière des transports en commun selon le type d’incapacité, population de 15 ans et plus avec incapacité, Québec

(Institut de la statistique du Québec, 2015)

Le nombre de personnes éprouvant de la difficulté à utiliser les transports en commun ou le service de transport adapté en raison de leur état varie également selon le type d’incapacité (visuel, mobilité, audition...).

D'après cette étude, nous constatons que les personnes qui ont des incapacités liées à la mobilité sont les moins utilisatrices des transports en commun, ce qui explique que ceux qui ont des limitations fonctionnelles relatives aux déplacements et qui sont touchés par le manque d'accessibilité des transports en commun sont surtout ceux qui ont des incapacités liées à la mobilité.

Les difficultés rencontrées par cette catégorie sont principalement l'action de monter à bord d'un véhicule ou en descendre ou se rendre aux arrêts ou repérer les points d'arrêts d'autobus (voir Tableau2). En effet, parmi les personnes de 15 ans et plus avec incapacité qui éprouvent des difficultés à utiliser les transports en commun, près de la moitié (48 %) ont mentionné avoir de la difficulté à monter à bord du véhicule ou à en descendre (tableau 2) ou encore la difficulté à se rendre aux arrêts ou à repérer les points d'arrêts d'autobus (38 %), l'achalandage trop élevé du réseau de transport (25 %).

	%
Difficulté de monter à bord du véhicule ou en descendre	47,9
Difficulté de se rendre aux arrêts ou repérer les points d'arrêts d'autobus	37,9
Le réseau de transport est trop achalandé	24,9
Difficulté de sortir dehors la maison peut aggraver l'état de santé de la personne ou engendrer des complications	22,2
Correspondance difficile à effectuer ou compliquée	17,7
Difficulté d'interpréter les horaires	15,5
Difficulté de voir les affiches, les avis ou les arrêts ou à entendre les annonces	14,7

Tableau 2 : population de 15 ans et plus avec incapacité éprouvant des difficultés à utiliser ces services en raison de leur état, Québec  
(Institut de la statistique du Québec, 2015)

On peut distinguer de ces difficultés celles qui sont liées à la catégorie des personnes présentant des incapacités liées à la mobilité.

La difficulté de monter ou descendre à bord du transport, se rendre aux arrêts, de planifier un voyage dans les heures de pointe... sont toutes des difficultés vécues pour les personnes se

déplaçant en fauteuils roulants lors de l'utilisation des divers modes de transports en commun.

### 1.2.2 Les enjeux de déplacement multimodal

Le déplacement d'un point de départ à un point d'arrivée constitue un itinéraire qui peut être long, d'accessibilité difficile, de lignes ou secteurs différents qui peuvent nécessiter plusieurs modes de transport.

Le déplacement multimodal peut offrir une diversité de choix dans les moyens de déplacement et surtout un service adapté au profil des utilisateurs comme l'accessibilité de certains moyens de transport pour les personnes qui se déplacent en fauteuil roulant. Cependant, ce service peut connaître divers enjeux étant donné les profils des utilisateurs différentes qui devraient être pris en considération, les arrêts et parcours non accessibles pour les personnes en fauteuil roulant, les conditions de montée à bord et de descente des moyens de déplacement, le manque de l'intégration de la conception sans obstacle selon les principes de conception universelle à certains processus de réalisation des services, l'accessibilité des outils transactionnels et informationnels ,etc.

La conception universelle, parfois désignée par le terme conception inclusive, a été définie auparavant comme « la conception de produits et d'espaces pouvant être utilisés par toute personne, dans la plus grande mesure du possible » (Mace, 1985). Un exemple serait la conception d'une entrée sur un seul niveau au lieu d'une rampe d'accès. Elle compte sept principes : 1. utilisation égalitaire ; 2. flexibilité d'utilisation ; 3. utilisation simple et intuitive ; 4. information perceptible ; 5. tolérance pour l'erreur ; 6. effort physique minimal ; 7. dimensions et espace libre pour l'approche et l'utilisation (Center for Universal Design, 1997).

### 1.2.3 Limites des méthodes et outils d'aide à la navigation existants pour les personnes en fauteuil roulant

Malgré l'avancement de technologie d'aide à la mobilité, les utilisatrices des fauteuils roulants font toujours face à des obstacles tels que l'achalandage dans les zones d'arrêts, la pente de la rampe d'accès de l'autobus , les pentes fortes de trottoirs, les largeurs assez gênées

ainsi que la neige et les obstacles des aménagements routiers dans les trottoirs (poteux, signalisations...) ainsi le nombre réduit des transports publics accessibles limite la mobilité des personnes éprouvant des incapacités liées aux déplacements. En effet, les critères d'accessibilités ont été définis en se basant sur quelques références comme le guide de RTC, le guide établi par l'association canadienne de la normalisation, l'Americans with Disabilities Act (ADA), (United States Access Board, 2004) et le guide pratique d'accessibilité universelle (Savard, 2010). Par exemple, d'après ces références, la valeur minimale de largeur pour un trottoir devrait être 91,5 cm et la valeur maximale de pente pour un trottoir de 8%, et aussi des normes d'accessibilités pour les bateaux pavés, les arrêts de bus, pour juger que l'itinéraire est accessible et l'infrastructure de transport l'est accessible bien évidemment.

Les capacités croissantes des appareils mobiles et leurs technologies de positionnement mobile se sont révélées très prometteuses dans les applications de localisation telles que les systèmes de navigation, comme le système de navigation Google Maps. L'un des composants essentiels d'un système de navigation est la base de données spatiale, car elle fournit les données de base pour les fonctions de navigation (les fonds de cartes, les transports utilisés) et de routage (calcul des itinéraires, réseau topologique). Cependant, les réseaux routiers ne fournissent pas une base de données aux systèmes de navigation pour piétons, car ceux-ci ne se déplacent pas au milieu des voies de circulation comme les voitures, mais ils se déplacent sur les trottoirs. Par conséquent, les données du réseau de trottoir, les signalisations, les arrêts de bus, l'infrastructure des réseaux de transports ainsi que les propriétés affectant l'accessibilité en déplacement sont nécessaires dans les applications de localisation pour les piétons et d'autres applications, y compris la planification des déplacements.

En outre, les méthodes et outils existantes dans le calcul des routages adaptés et accessibles pour les personnes utilisatrices des fauteuils roulants présentent beaucoup de limites. En fait, pour appliquer ces algorithmes, des contraintes supplémentaires doivent être imposées pour le calcul des routes optimales. L'une des informations fondamentales à considérer dans le calcul de l'itinéraire est liée à l'accessibilité des itinéraires en fonction de profils des personnes ayant des incapacités.

Des efforts intensifs ont été menés pour faciliter la navigation et le déplacement des personnes à mobilités normales ou les PFR (Beale et al., 2006; Gharebaghi & Mostafavi,

2016; Hashemi & Karimi, 2017; Kasemsuppakorn & Karimi, 2009; Matthews et al., 2003). Cependant, les applications telles que Google Maps, WheelMap, AccèsSIG et, etc. ne sont pas adaptées totalement pour le déplacement multimodal des PMR (voir Tableau 3). Par exemple, Google Maps permet la navigation en déplacement multimodale, mais ceci ne suggère pas les transports accessibles et adaptés pour les personnes qui se déplacent en fauteuil roulant.

Plus récemment, plusieurs efforts de recherches et développements ont été menés sur l'accès en fauteuil roulant dans le réseau piétonnier. Par exemple, les travaux proposés par Gharebaghi, (2018) considèrent l'accessibilité du secteur piétonnier pour les PFR en incluant les facteurs environnementaux et sociaux pour évaluer l'accessibilité du réseau piétonnier (Gharebaghi, 2018). Cependant, ces recherches n'ont pas considéré le déplacement multimodal des utilisatrices de fauteuil roulant dans le milieu urbain.

Sur le plan des applications disponibles, prenons l'exemple de système développé par Beale et al. (2006) appelé U-Access qui est un système de planification de route basé sur le Web. Cet outil facilite la navigation des piétons aux capacités différentes et fournit un système de planification de trajet en utilisant l'itinéraire le plus court possible comme critère. Ce modèle a été classé en trois niveaux de profils, les personnes ambulantes, personne avec mobilité assistée et utilisateur de fauteuil roulant. Le réseau piétonnier en U-Access inclut les caractéristiques du trottoir (largeur minimale, hauteur minimale des marches), qualités des entrées (porte poignées, hauteur minimale de marche, largeur), stationnement (largeur) et les rampes (pente, largeur, rayon de braquage). Cependant, cet outil ne propose pas des parcours qui nécessitent un déplacement avec divers modes de transports.

WheelMap (Mobasheri et al., 2017) est un projet ayant pour objectif de faciliter le partage de l'information sur l'accès aux lieux publics pour des personnes qui se déplacent en fauteuil roulant à travers une application mobile qui permet la recherche, l'affichage et l'ajout de points d'intérêts (POI) avec des photographies et commentaires. WheelMap ne propose pas des itinéraires accessibles, mais plutôt des photographies et avis des utilisateurs sur l'accessibilité des lieux publics, elle est également disponible sur plateforme web.

Handimap (2010), a pour objectif d'aider les usagers à avoir les informations sur l'accessibilité de leurs villes. Cette application conçoit des cartes de déplacement à partir des données disponibles sur chaque territoire. Elle propose un système de calcul d'itinéraires

adaptés à chaque type de handicap. Handimap a la capacité de gérer toutes les données d'accessibilité (trottoirs, passages piétons, établissements publics, stations et lignes de transports...) et les mettre à jour dans le temps.

En résumé, nous pourrions constater depuis les applications et outils présentés que ces outils ne sont pas capables d'offrir un déplacement multimodal pour les Personnes en Fauteuil Roulant (PFR) en ville.

### 1.3 Objectifs

#### 1.3.1 Objectif général

L'objectif général de ce projet est de proposer des itinéraires personnalisés adaptés au profil des personnes à mobilité réduite qui se déplacent en fauteuil roulant manuel dans un contexte de déplacement multimodal.

#### 1.3.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif général de ce projet, nous visons les objectifs spécifiques suivants :

1. Identifier et définir les facteurs environnementaux en lien avec le déplacement multimodal de personnes à mobilité réduite se déplaçant en fauteuil manuel,
2. adapter une méthode d'évaluation de l'accessibilité personnalisée dans le contexte de déplacement multimodal,
3. Développer un algorithme de routage et des fonctionnalités pour une application géospatiale mobile (MobiliSIG) qui propose des itinéraires accessibles pour le déplacement multimodal des personnes utilisatrices de fauteuil roulant,
4. Évaluer et valider les résultats en proposant des scénarios de déplacements d'étude à la ville de Québec.

### 1.4 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs de notre projet, nous proposons une méthodologie composée de 4 étapes.

#### **Phase 1 : Analyse des besoins et de l'existant :**

La première étape consiste à la revue littérature pour bien analyser l'existant et les besoins pour notre recherche.

Dans un premier temps, une revue de la littérature pertinente nous a permis d'approfondir plusieurs sujets, tels que les différentes notions d'accessibilité, mobilité, transport multimodal, les théories de Modèle de Développement Humain- Processus de Production de Handicap (MDH-PPH) sur lequel on se base pour définir les facteurs sociaux-environnementaux et pour définir la notion de handicap et participation sociale ainsi nous avons mis une loupe sur le contexte global des applications d'aide à la navigation pour les personnes en fauteuil roulant dont ceux qui offrent l'option de déplacement multimodale comme Wegoto et Sumo. En effet, un retour sur les différentes méthodologies pour la recherche des facteurs environnementaux qui peuvent affecter le déplacement multimodal ainsi que les concepts pertinents dans le domaine des SIG, des théories de graphes, algorithme de plus court chemin de Dijkstra et structure des données géométriques, l'analyse des réseaux et le développement des applications géospatiales sur le web en englobant toutes les notions techniques sur ce processus. Un état de situation est ensuite présenté concernant les outils existants. Une analyse profonde des outils et applications existantes nous a permis d'identifier leurs avantages et leurs limites et les solutions potentielles pour la conception de notre système. À la lumière des connaissances acquises lors de la revue de littérature, nous avons ensuite procédé à l'identification des facteurs socio-environnementaux affectant le déplacement multimodal pour but de personnaliser les trajets selon les profils des utilisateurs. Nous avons également exploré des algorithmes de routage qui s'adaptent avec nos besoins pour planifier des itinéraires accessibles en utilisant dans un réseau géométrique permettant le déplacement multimodal en ville.

## **Phase 2: Conception :**

Après la revue littérature et les analyses des besoins, vient la deuxième étape qui serait de choisir la base de méthodologie pour la conception de notre système commençant par l'exploitation de modèle de MDH-PPH dont nous allons utiliser une approche basée sur les confiances de l'utilisateur pour la mesure des capacités humaines par rapport aux facteurs environnementaux pour aboutir à un résultat de déplacement par suite du résultat de l'interaction des facteurs personnels et environnementaux. Pour ce faire, nous allons

identifier les facteurs environnementaux affectant le déplacement multimodal pour les personnes en fauteuil roulant ce qui nous mène à compléter l'interface des profils des utilisateurs dans l'application MobiliSIG. Par la suite, nous allons calculer l'indice d'accessibilité pour les itinéraires en fonction de la confiance et capacité de l'utilisateur et les facteurs environnementaux. En effet, pour cette étape la recherche des facteurs affectant l'accessibilité de déplacement est une étape primordiale et pertinente pour la suite du projet. Finalement, la préparation des données et d'un réseau multimodal, l'intégration des données et l'algorithme de routage dans la base de données.

D'après nos recherches, plusieurs approches ont été proposées en lien avec l'évaluation de la capacité de l'utilisateur de fauteuil roulant tels que Wheelchair Outcome Measure (WhOM) (Mortenson et al., 2007), Wheelchair Skill Test (WST) (Kirby et al., 2002), et Wheelchair Circuit (Kilkens et al., 2004). En outre, (Rushton et al., 2011) a employé le critère de confiance de l'utilisateur en fauteuil roulant pour réaliser un déplacement sur le réseau piétonnier. Pour ça, une approche basée sur les confiances des utilisateurs est utilisée par l'addition des valeurs de confiances à chaque segment en intégrant la confiance de l'utilisateur par rapport à chaque propriété d'un segment de trajet comme suit :

$$A_{ijl} = \sum_{p=1}^7 Con_{ijp}$$

Où,  $A_{ijl}$  est l'indice d'accessibilité du segment  $j$  pour la personne  $i$  par type de déplacement  $l$ ;  $Con_{ijp}$  est le niveau de confiance de la personne  $i$  pour le segment  $j$  par rapport à la propriété  $p$ .

Dans ce projet, nous avons adapté cette approche en intégrant les nouvelles propriétés et en ajoutant d'autres modes de transports comme le bus. Nous intégrons les difficultés qu'un utilisateur rencontre dans l'utilisation des divers modes de transport, son évaluation personnelle selon ses capacités visant les facteurs affectant l'accessibilité dans son déplacement. Après la recherche de ces facteurs, on procède au développement de l'algorithme de routage basé sur l'algorithme de Dijkstra modifiée qui devra inclure ces facteurs et offrir la possibilité de déplacements multimodaux accessibles selon le profil de l'utilisateur.

Puis, nous acheminons le développement des outils de routage en profitant des fonctionnalités de pgRouting et en modifiant l'algorithme Dijkstra selon nos besoins pour un déplacement multimodal accessible ainsi les fonctionnalités offertes pour personnaliser un

tel itinéraire selon le profil de l'utilisateur. Nous avons développé pour ça, un algorithme Dijkstra modifié, les technologies de cartographies et de publications des données géospatiales sur internet ont été utilisées.

En outre, plusieurs approches ont été élaborées pour le calcul de routage personnalisé pour les personnes qui se déplacent en fauteuil roulant. Kasemsuppakorn & Karimi (2009) ont développé un modèle pour personnaliser le routage pour les utilisateurs de fauteuil roulant en se concentrant sur les priorités des utilisateurs et les paramètres des trottoirs. Trois méthodes de pondération ont été utilisées dans cette recherche: la méthode de restriction absolue (ARM), la méthode de restriction relative (RRM) et la méthode de réduction de chemin (PRM). Chaque méthode a été réalisée en quatre étapes: (1) pondération des paramètres du trottoir, (2) quantification de la valeur d'impédance de chaque segment, (3) modélisation des itinéraires pour les utilisateurs de fauteuil roulant, et (4) choix de l'itinéraire optimal. Ils ont utilisé un processus de hiérarchie analytique (AHP) et une approche de logique floue (Fuzzy logic) pour quantifier l'impédance de chaque segment, respectivement. Cette méthode a été évaluée avant via la participation de cinq utilisateurs de fauteuil roulant (Kasemsuppakorn & Karimi, 2009).

Ainsi, dans notre projet nous avons un réseau constitué de plusieurs données telles que le réseau piétonnier, le réseau de transport et les bases de données relatives donc les trajets et scénarios sont plus complexes que dans un réseau simple comme le piétonnier et plusieurs facteurs vont contribuer à l'accessibilité dans ce réseau. Cependant, on a élaboré une nouvelle approche de calcul d'itinéraires basés sur l'accessibilité, le temps de déplacement. Donc, nous avons intégré nos réseaux de déplacement disponible dans la ville de Québec pour que la personne ayant une déficience physique puisse avoir plus de choix des moyens de déplacement sans être obligée de se déplacer pour de longs trajets seulement sur son fauteuil roulant, il pourra par exemple planifier un trajet personnalisé selon ces préférences et programmes et ça en planifiant son parcours en avance.

### **Phase 3: Réalisation :**

Après la conception de notre système et l'analyse des étapes pour le développement de notre système, on vient à l'étape de réalisation. Pour cette étape, nous avons utilisé les données ouvertes de la ville de Québec, la bibliothèque des données ouvertes Géoindex+, ainsi les données de RTC pour la cartographie des réseaux de transports et les arrêts où l'utilisateur

devrait attendre l'arrivée de son moyen de déplacement. Donc une étape de prétraitement et préparation du réseau était nécessaire pour combiner les réseaux qu'on va utiliser (le réseau piétonnier, réseau de bus, les arrêts de bus, etc...) pour construire un réseau topologique valide constituant la base de données d'accessibilité.

L'intégration de réseau et la base de données se fait en utilisant les outils de gestion des bases de données open source postgresSQL et les extensions postgis et pgRouting.

Les données de réseau développé ont un format de données vectorielles avec références spatiales donc ces données pourront être converties en Geojson pour pouvoir finalement les diffuser sur l'application MobiliSIG web et les exporter sur un serveur cartographique tel que Geoserver puis leurs publications avec la bibliothèque JavaScript de cartographie en ligne Leaflet.

#### **Phase 4 : Expérimentation et validation :**

Cette étape vient de valider notre prototype établi afin de s'assurer de notre développement et notre méthodologie et les fonctionnalités des outils développés. Pour ce faire, une application web d'aide à la planification en déplacement multimodal a été développée pour les personnes utilisatrices de fauteuil roulant. Finalement, nous avons testé et validé l'application en mettant en place des scénarios démonstratifs de nos interfaces de planification et en comparant avec l'application Google Maps.

L'organigramme de la méthodologie proposée est présenté dans la figure 1:

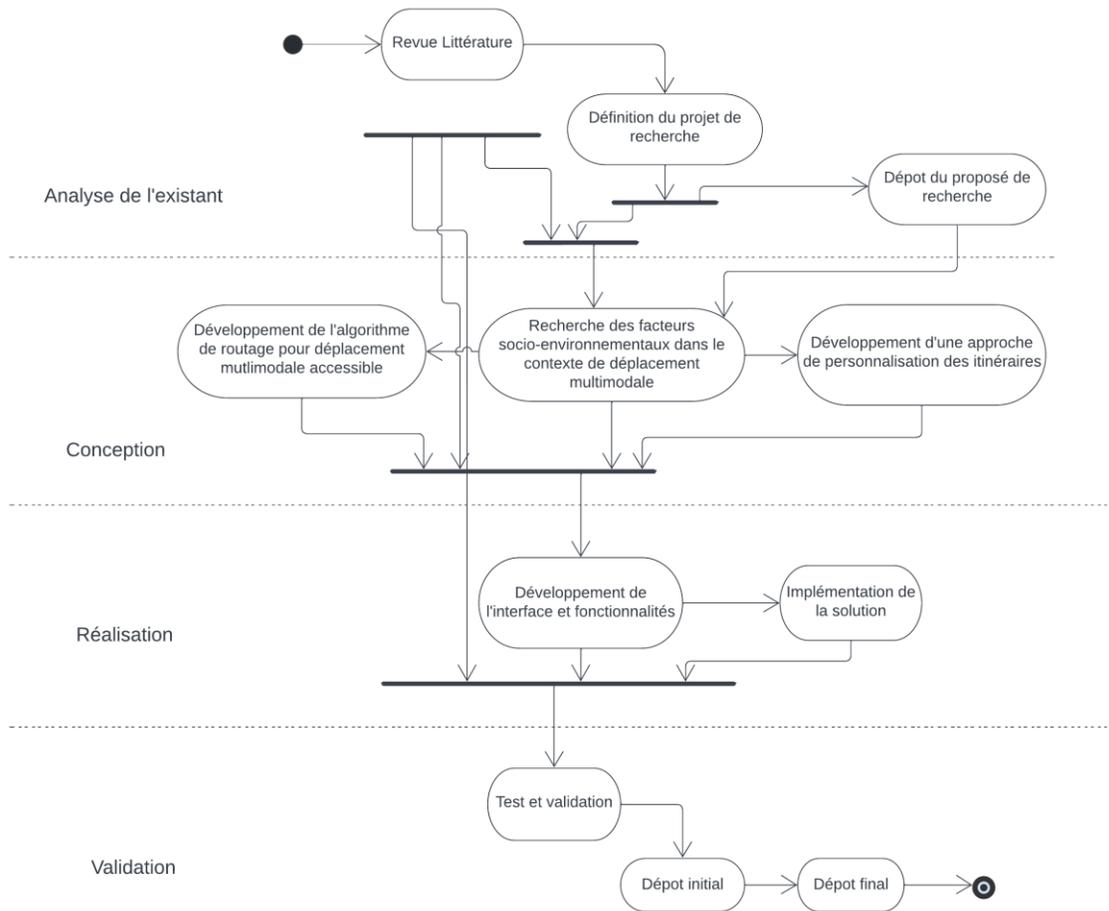


Figure 1 : Organigramme de la méthodologie

### 1.5 Organisation du mémoire

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres ainsi que l'introduction et la conclusion. Dans la partie introduction, nous avons présenté successivement la mise en contexte de la recherche, la revue littéraire et l'état de situation pour certaines applications et projets qui traitent le même thème d'étude ou similaire, la problématique de projet, les objectifs et la méthode adoptée pour résoudre la problématique. Dans le chapitre 2, nous définissons, d'abord, quelques notions théoriques liées au concept de MDH-PPH, à l'accessibilité, handicap, participation sociale et transport multimodal. Ensuite, nous faisons l'état des connaissances ou de situation des systèmes d'aide à la navigation existantes et nous

identifions les limites et besoins par rapport à notre objectif. Finalement, nous étudions les méthodes d'évaluation des capacités humaines pour identifier les facteurs environnementaux affectant l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal et la façon d'intégrer ces propriétés afin de personnaliser l'itinéraire selon le profil de l'utilisateur comme dans l'interface de profil de MobiliSIG. Dans le chapitre 3, nous présentons les facteurs environnementaux affectant l'accessibilité de déplacement multimodal pour les personnes en fauteuil roulant. En effet, une revue de littérature a été faite à partir de plusieurs sources et références scientifiques pour identifier les facteurs environnementaux affectant l'accessibilité en déplacement multimodal ainsi que des entrevues et ateliers avec des personnes en fauteuil roulant ont été élaborés en collaboration avec un autre projet dont ces personnes ont exprimé leurs perceptions et besoins envers l'accessibilité en transport en commun. Le chapitre 4 se concentrera sur la méthode adoptée pour la personnalisation des itinéraires dans le contexte de multimodalité de déplacement. Cette approche commence par l'assignation des confiances d'utilisateurs selon les propriétés (facteurs environnementaux) définies précédemment puis nous calculons l'itinéraire accessible selon le profil de l'utilisateur. Ensuite, nous développons l'algorithme de routage multimodal qui prend en considération le profil de l'utilisateur pour proposer le chemin accessible selon son profil. Finalement dans le chapitre 5, nous présentons l'architecture de notre système et les choix technologiques permettant de diffuser nos interfaces de planification sur le web. En premier lieu, nous intégrons l'algorithme dans l'extension de calcul d'itinéraires open source pgRouting et les données de notre réseau dans la base de données. Ensuite, nous expliquons l'implémentation de l'algorithme de routage, les principes et fonctionnements. Finalement, nous présentons quelques scénarios afin de tester et valider la solution proposée dans le cadre d'un cas d'étude à la ville de Québec. Pour la conclusion, une section qui rappelle les objectifs de cette recherche est élaborée, une autre section présentera l'apport et discutera les résultats, finalement une section proposera des perspectives en mettant en lumière les futurs travaux.

## Chapitre 2 : Revue Littérature

Ce chapitre présente une revue de littérature et les concepts liés à la mobilité des personnes utilisatrices de fauteuil roulant et les technologies géospatiales d'assistance à la mobilité de ces personnes. Dans la première section, nous allons traiter les notions de l'accessibilité et de la mobilité comme besoins fondamentaux pour la participation sociale des personnes avec des incapacités physiques. Dans la deuxième section, nous passons en revue les outils de mesures de l'accessibilité de l'environnement, les méthodes d'évaluation des capacités humaines par rapport aux facteurs environnementaux ainsi que les méthodes de mesure de l'accessibilité de déplacement dans le contexte de déplacement pour les personnes en fauteuil roulant. Enfin, nous identifions les avantages et les limites des solutions existantes et nous définissons quelques notions liées aux réseaux de graphes, algorithme plus court chemin et Dijkstra nécessaire pour le développement de l'algorithme de routage.

### 2.1 Notions de base et concepts

Nous commençons par définir des notions de base en liaison avec notre projet. Le concept de MDH-PPH et les notions de handicap, accessibilité, multimodalité de déplacement, théories de graphes et algorithmes du plus court chemin pour le développement de l'algorithme de routage sont très utilisés dans notre projet puisque nous visons un système de planification d'un déplacement multimodal accessible selon le profil de l'utilisateur.

#### 2.1.1 Modèle de développement humain – Processus de production du handicap

Le Modèle de développement humain – Processus de production du handicap (MDH-PPH) est composé de trois groupes de concepts fondamentaux incluant les facteurs personnels, environnementaux et les habitudes de vie. Le MDH-PPH est un modèle conceptuel qui vise à documenter et expliquer les causes et conséquences des maladies, traumatismes et autres atteintes à l'intégrité ou au développement de la personne.

Les modèles de handicap actuels sont basés sur des modèles sociaux, où la déficience est utilisée pour l'état physique du corps et le handicap est lié à l'environnement en tant que facteur important dans l'apparition de la situation de handicap tels que dans le modèle du processus de production du handicap (PPH) (P Fougeyrollas et al., 1998) ou le modèle de

l'Institut de Médecine (IOM) (Jr EN et AM 1997). Cependant, il existe d'autres modèles qui définissent le handicap comme étant un état de restriction ou de perturbation de la fonction physique, mentale ou sociale d'une personne, qui peut être causée par un déficit ou un manque de moyens d'adaptation tels que dans le modèle de la Classification internationale du fonctionnement (CIF) (Organisation, 2001).

En outre, le MDH-PPH (voir figure 4) nous montre que l'interaction entre les facteurs personnels et facteurs environnementaux produit la réalisation ou non de l'habitude de vie. Par exemple, lors d'un déplacement, une personne avec une déficience motrice rencontre un obstacle comme une pente assez intense ce qui l'empêche de réaliser son habitude de vie (le déplacement pour aller travailler).

Les facteurs environnementaux présentés dans ce modèle sont définis comme une des composantes les plus importantes du modèle PPH. Ces facteurs ont été divisés en deux catégories : les facteurs sociaux et les facteurs physiques (Fougeyrollas et al., 1998). Les facteurs physiques sont subdivisés en deux sous-classes principales, la nature et l'aménagement, les facteurs sociaux sont de leurs parts subdivisés en facteurs politico-économiques et facteurs socioculturels.

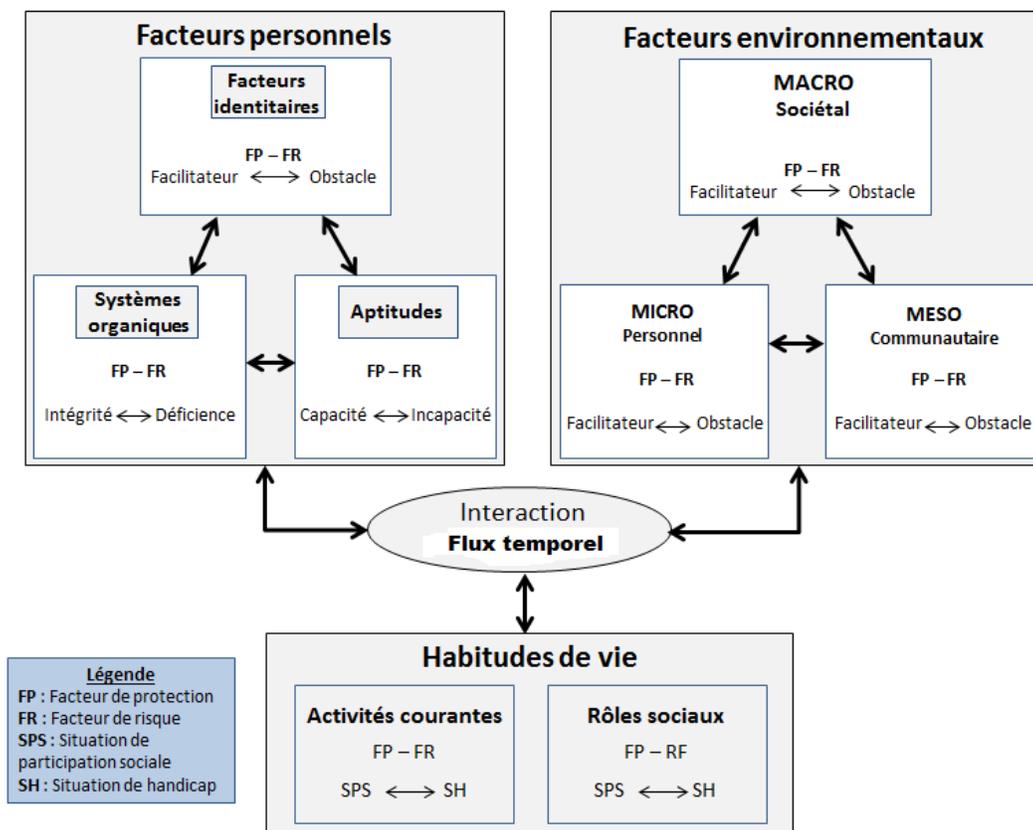


Figure 2 : Modèle MDH-PPH (P Fougeyrollas et al., 1998)

Source : <https://ripph.qc.ca/modele-mdh-pph/le-modele/>, consulté le 17/01/2022

### 2.1.2 Handicap et participation sociale

Le handicap n'est pas une caractéristique de la personne, mais plutôt de la situation dans laquelle elle se trouve. Le handicap est causé par la société, car elle ne prend pas en compte les caractéristiques et les diversités de besoins des individus pour leur offrir un accès égal aux opportunités de participation (Fougeyrollas et al., 1998).

Les types d'incapacités présentés chez certaines catégories de Canadiens ont été classés sur 8 groupes (vision, audition, mobilité, flexibilité, dextérité, douleur, apprentissage, développement, santé mentale, mémoire) (Enquête sur l'incapacité, 2017).

Une autre subdivision utilisée par statistique Canada qui comporte 5 groupes parmi les types d'incapacités et qui sont les sources les plus courantes d'incapacités (vision, audition, physique (c'est-à-dire mobilité, flexibilité, dextérité et douleur), apprentissage,

psychologique (c'est-à-dire émotionnel, psychologique ou de santé mentale) ; (Enquête sociale générale, 2014).

Selon le Modèle de développement humain – Processus de production du handicap (MDH-PPH), la qualité de la participation sociale des personnes ayant des incapacités est le résultat d'interaction entre les facteurs personnels (identité et capacités physiques et mentales, ...) et les facteurs environnementaux (physiques et sociaux) (Gharebaghi et Mostafavi 2016).

La participation sociale et la situation de handicap sont des termes couramment utilisés aujourd'hui surtout après le développement du modèle MDH-PPH ( Fougeyrollas, 2010). La participation sociale liée à la mobilité peut être limitée ou irréalisable en raison de l'interaction d'un ou plusieurs facteurs environnementaux avec un ou plusieurs facteurs personnels qui résultent d'une difficulté ou d'un empêchement de réaliser les habitudes de vies (Patrick Fougeyrollas et al., 1998).

### 2.1.3 Accessibilité

Dans le contexte de la mobilité urbaine, l'accessibilité est souvent définie par la facilité d'accès à une destination tout en considérant les contraintes de distance, de temps et de coût (Gharebaghi, 2018).

L'accessibilité universelle (Steinfeld, Edward, 2012) est un des concepts d'aménagement qui vise à créer des environnements accessibles avec la possibilité de modifier ou ajouter des adaptations. Par exemple, l'installation d'une rampe d'accès pour accéder à un édifice.

L'accessibilité des lieux fait partie des conditions essentielles à la participation sociale des personnes en situation de handicap qui vise à améliorer l'accès aux milieux et aux services pour l'ensemble de la population. L'accessibilité devrait permettre à tous un accès aux biens et aux services offerts (OPHQ, 2019).

### 2.1.4 Multimodalité et intermodalité de déplacement

Un déplacement intermodal est défini par l'utilisation en série de plusieurs modes de déplacement pour les passagers, ou les marchandises, d'une place à une autre (Febbraro & Sacone, 1996).

Le transport multimodal consiste à combiner plusieurs moyens de transport pour arriver à une destination (Gräbener, Berro, et Duthen 2010) .

La multimodalité de déplacement définit l'utilisation de plusieurs modes de déplacement en général. Par contre, l'intermodalité utilise plusieurs modes de transport pour un même déplacement.

Il n'y a pas un véritable consensus à propos ces définitions, dans notre projet on définit le déplacement multimodal l'itinéraire combinant successivement deux modes de déplacements soit le déplacement en fauteuil roulant et le déplacement en transport en commun (Bus).

### 2.1.5 Notion de graphe et algorithme du plus court chemin

La recherche d'un plus court chemin dans un graphe permet de trouver le chemin minimisant la somme du coût (distance, temps) des arêtes entre un nœud  $u$  et un nœud  $v$ . Ce problème peut se résoudre en utilisant un algorithme tel que l'algorithme de Dijkstra (Idri et al., 2017). Les graphes et les algorithmes des plus courts chemins sont les notions de base les plus connues dans le développement des algorithmes de routage.

Un graphe est composé des sommets et des arcs (ou arêtes). Un arc relie deux sommets entre eux : un sommet de départ et un sommet d'arrivée.

Les graphes peuvent servir à modéliser :

- Un réseau routier dont chaque ville est un sommet, chaque route entre deux villes est un arc ou deux arcs, un dans chaque sens si la route n'est pas à sens unique.
- Un réseau routier dans une ville dont chaque intersection est un sommet, chaque tronçon de rue entre deux intersections est un arc.
- Un réseau de transport, réseau de déplacement multimodal qui nous intéresse dans notre projet.

Un réseau ou graphe de transport est :

- Un graphe orienté  $G = (S, A)$  pondéré par  $c(u, v)$  appelé capacité ou coût de l'arc  $(u, v)$ , positif ou nul.
- Deux sommets particuliers :  $s$  et  $t$  (respectivement source et destination).
- Pour toute paire de sommets  $(u, v)$ , si  $(u, v) \in A$ ,  $c(u, v) = 0$ .

L'algorithme de Dijkstra cherchera le chemin le plus court à partir du nœud initial jusqu'au nœud de destination et cet algorithme comparera le poids le plus faible du nœud initial au nœud de destination pour trouver le chemin le plus efficace (Salem et al., 2022).

La figure 3 nous montre en 3 étapes dans un graphe simple la façon dont l'algorithme procède pour aller d'un Sommet aux autres sommets voisins et pondère les voisins visités pour choisir l'itinéraire le plus court. En effet, en commençant par le sommet 0 il choisit le coût 3 puisque c'est plus faible que 5 puis choisit 1 pour avoir un coût total de 3 qui est le plus faible pour arriver à sa destination 3.

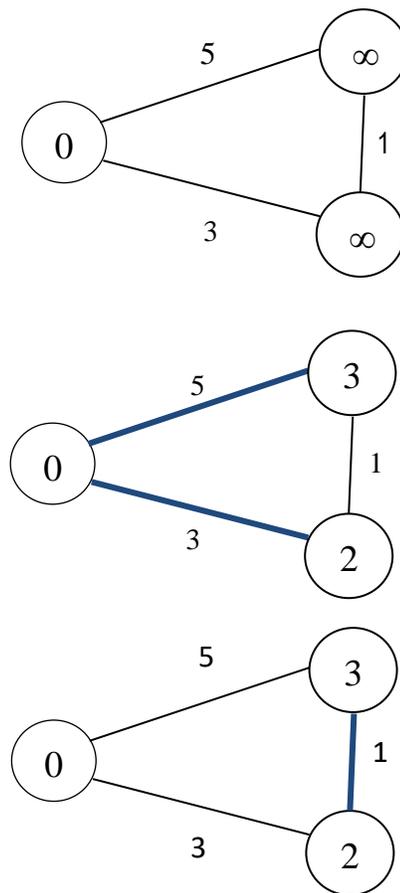


Figure 3 : Recherche de plus court chemin, algorithme Dijkstra

## 2.2 Outils de mesure de l'environnement utilisant les facteurs environnementaux et perceptions des personnes

Bien que l'accessibilité de déplacement dans un milieu piétonnier dépende de facteurs environnementaux tels que la pente et la largeur du trottoir, l'accessibilité des itinéraires est

également liée aux capacités humaines. En effet, les interactions entre les facteurs personnels et les facteurs environnementaux devraient être prises en compte pour identifier l'accessibilité de déplacement dans un milieu urbain.

Le réseau de PPH (Patrick Fougeyrollas, 2010) a développé un outil de mesure de la qualité de l'environnement (MQE). La MQE propose des questionnaires déterminant la perception de l'influence des facteurs environnementaux physiques et sociaux dans la réalisation des activités quotidiennes soient comme facilitateurs ou obstacles ou bien sans aucune influence. Cette influence est mesurée sur un continuum allant de facilitateur majeur (+3) à obstacle majeur (-3) et 0 sans influence.

Dans une autre recherche réalisée par une équipe du Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale (CIRRIS) au Québec, un projet portant le nom MEA (Mesure de l'environnement accessible) utilise deux grandes classes (environnement interne et environnement externe) pour décrire l'accessibilité d'un lieu (Gamache, 2018). Il s'appuie sur les concepts d'accessibilité universelle, conception universelle, PPH-MDH. (Gamache, 2018), a déterminé les composantes d'environnements à mesurer et les critères utilisés pour chaque élément, par exemple dans la Figure 5, la mesure des pentes transversales et longitudinales, la surface, les obstacles, etc... dans un milieu piétonnier.

1 > Milieu piétonnier  
Bateau-pavé / abaissement

Instruments de mesure nécessaires 

#	Éléments	Composantes	Critères	Mesures réelles	Absent	Conformité	Observations et modifications
1		Revêtement	Uniforme, continue et antidérapante même si mouillée <sup>8</sup>				
2		Obstacles	Absence d'irrégularité ou de trou devant				
3	Surface	Joints	Type : trait de scie <sup>8</sup>				
4		Alignement	Avec le corridor de circulation sans obstacle sur le trottoir et guidant les piétons vers le passage qui leur est réservé <sup>14</sup>				
5	Pallier (haut)	Profondeur	≥ 1200 mm <sup>9</sup>				
6	Transition	Au centre	Sur une longueur de ≥ 1500 mm <sup>8,10</sup>				
7	Pente longitudinale	Au centre	≤ 6,66 % (1:15) <sup>8</sup> • Si ses côtés sont évasés : 6,66-10 % (1:15-1:10) <sup>8</sup>				
8	Pentes transversales		• Aux carrefours, intersections : < 2 % (1:50) <sup>8</sup> • Aux traverses pour piétons en section courante sur aire de circulation de véhicules : < 5 % (1:20) <sup>8</sup>				
9		Si contre-pente > 11 % (latérale)	Transition commençant à la base du bateau et se prolongeant sur toute sa largeur (latérale) sur une longueur de ≥ 600 mm dans la rue <sup>8</sup> et d'une contre-pente ≤ 2 % (1:50) <sup>8</sup>				
10	Largeur de l'abaissement	Excluant côtés évasés	1200-1500 mm <sup>9</sup>				
11		Forme	Biseautée ou arrondie <sup>8</sup>				
12	Bordure (ressaut)	Hauteur	≤ 20 mm <sup>12</sup> par rapport au pavage (idéalement ≤ 13 mm) sans être réduite à 0 pour la détectabilité <sup>8</sup>				
13		Démarcation	Motifs de couleurs contrastantes (≥ 70 %), de bandes décoratives ou de bordure de rue en granite <sup>8</sup>				
14		Distance entre 2 ressauts	> 2500 mm <sup>12,13</sup>				
15	Indicateurs tactiles	Distance avec la bordure	150-200 mm <sup>8</sup>				
16		Longueur	600-650 mm <sup>8</sup>				
17	Éclairage		Dirigé vers le bateau-pavé ou l'abaissement de trottoir : ≥ 50 lux				
18	Obstacles	Distance	> 900 mm <sup>14</sup>				
19		Localisation	De part et d'autre de la voie <sup>14</sup>				
20		Largeur entre	≥ 1400 mm <sup>9</sup>				
21	Potelets (si présents)	Hauteur	1200 mm <sup>14</sup>				
22		Contraste	Sommet contrasté (≥ 70 %) <sup>14</sup>				
23		Chaines	Ne pas relier les potelets par des chaînes <sup>14, 18</sup>				

Figure 4 : Exemple d'outil de mesure de l'accessibilité de l'environnement d'un milieu piétonnier dans le projet MEA

Matthews et al., (2003) et Beale et al., (2006) ont développé un système d'information géographique (SIG) dans le cadre du projet Modeling Access with GIS in Urban Systems (MAGUS). MAGUS a utilisé les perceptions des utilisateurs de fauteuil roulant pour identifier les obstacles les plus importants et les intégrer par conséquent dans le modèle SIG. Ils ont identifié 10 principaux types d'obstacles qui touchent l'accès et le déplacement dans les environnements urbains, notamment les marches, les caniveaux profonds, les trottoirs étroits, les rampes/pentes, les cambures, le mauvais entretien des sentiers, les plaques d'égout surélevées, les éléments urbains fixe et les passages non sécuritaires.

Tajgardoon & Karimi (2015) ont cités diverses caractéristiques des segments de trottoir afin d'évaluer l'accessibilité des trottoirs pour les PFR. Ces caractéristiques comprenaient la longueur des segments, la pente, la largeur, la qualité de la surface et différentes zones de circulation sur les trottoirs. Dans cette recherche, les perceptions des utilisateurs en interaction avec les facteurs environnementaux sont nécessaires pour évaluer l'accessibilité de déplacement.

Au Québec, un projet intitulé « MobiliSIG » qui vise à développer un outil d'assistance technologique offrant les meilleurs itinéraires possibles (optimales) en termes d'accessibilité pour les personnes en Fauteuils roulants. Les recherches des facteurs environnementaux et personnels et leur intégration dans la base de données spatiales pour la conception d'un SIG et application mobile pour aider les personnes utilisatrices du fauteuil roulant dans leurs recherches d'itinéraires de minimum d'obstacles selon leurs perceptions et capacités. Les facteurs environnementaux dans ce projet ont été divisés entre des propriétés physiques (pentes, largeurs, qualité surface, bateau pavés...) et sociales (normes, politiques de déneigement, signalisations ...) caractérisant l'environnement des voies piétonnières. Ces propriétés ont été subdivisées en propriétés permanentes (bateau pavé de trottoir, pentes, intersections...) et propriétés temporelles (neiges, qualité de surface, achalandage...), ces propriétés sont regroupées dans le tableau 5. En effet, pour l'analyse de l'accessibilité selon l'approche basée sur les perceptions et capacités des utilisateurs, Ils ont utilisé WheelCon-M qui est un questionnaire spécialement développé pour les utilisateurs de fauteuil roulant manuel. Ce questionnaire comprend 65 éléments identifiés par une enquête Delphi à trois volets parmi un comité d'experts pour générer un agrément sur le contenu du questionnaire de WheelCon-M. Cette approche est l'une des approches les plus fiables pour évaluer les

capacités des utilisateurs de fauteuil roulant (Rushton et al., 2013). Suite à une analyse statistique, ils ont choisi les questionnaires les plus pertinents pour la mobilité sur le réseau piétonnier pour les personnes en fauteuil roulant. Les éléments sélectionnés sont les suivants : déplacer le fauteuil roulant 1) sur des surfaces de pente abrupte supérieure à 5%, 2) sur un trottoir pavé crevassé et inégal, 3) sur un trottoir couvert de 5 cm de neige, 4) à travers un trou de plus de 5 cm de profondeur, 5) le long d'un trottoir de gravier non tassé, 6) sur un terrain plat, gazonné, sec et fraîchement coupé, 7) sur un chemin ou un sentier de terre comportant quelques racines d'arbre et des pierres, 8) à descendre un trottoir d'une hauteur standard de 15 cm (6 pouces) sans trottoir abaissé ou bateau pavé, 9) à monter un trottoir d'une hauteur standard de 15 cm (6 pouces) sans trottoir abaissé ou bateau pavé, 10) en une traverse piétonnière dépourvue de feux de circulation, 11) afin d'appuyer sur le bouton d'appel de feux pour piétons et traverser la rue avant que les feux ne changent, 12) dans une foule sans heurter quelqu'un. Ces éléments sont utilisés comme paramètres les plus importants pour les utilisateurs de fauteuil roulant manuel pour analyser leur mobilité dans une zone urbaine.

Propriétés	Nature Temporelle
Pente	Permanente
Dénivellation	Permanente
Largeur	Permanente
Type de surface	Permanente
Signalisations	Permanente
Neiges	Temporelle
Accessoires urbains	Temporelle
Achalandage	Temporelle

Tableau 3 : Quelques propriétés permanentes et temporelles choisies comme des facteurs environnementaux dans le projet MobiliSIG

### 2.3 Etat de situation sur des méthodes d'évaluation d'accessibilité de déplacement pour personnes en Fauteuil roulant

Plusieurs approches ont été utilisées dans diverses recherches qui ont pour but d'évaluer le niveau d'accessibilité des segments de réseau. Dans ces approches, le poids est déterminé pour chaque segment en fonction des préférences et des capacités des personnes qui indiquent à quel point chaque segment est favorable à un voyage. Ce poids est considéré comme la valeur de coût de chaque segment et varie selon les contextes. Cela pourrait être lié à la distance, au temps, à l'accessibilité et ainsi de suite. Les segments pondérés sont ensuite utilisés dans l'étape de calcul de l'itinéraire où un algorithme considère le poids de chaque segment afin de déterminer un itinéraire optimal.

Le MAGUS développé par (Matthews et al., 2003) et (Beale et al., 2006) a utilisé les commentaires des utilisateurs de fauteuil roulant pour identifier les obstacles les plus importants, quantifier les obstacles et, par conséquent, les intégrer dans le modèle SIG à partir des perceptions des utilisateurs. Ils ont identifié et quantifié les principaux obstacles qui entravent l'accès et la mobilité dans les environnements urbains, y compris les marches, les chaussées étroites, les rampes et les pentes locales, le mauvais entretien des sentiers, etc. Dans MAGUS, les obstacles dans un contexte de déplacement multimodal n'ont pas été pris en considération et la valeur d'impédance de chaque segment a été calculée à l'aide de modèles mathématiques, puis les routes optimales ont été calculées. Ces calculs tenaient compte de six critères d'acheminement, à savoir la distance la plus courte, les barrières minimales, le moins de pentes, l'évitement des mauvaises surfaces, l'utilisation de passages à niveau contrôlés seulement et le nombre limité de passages à niveau.

Jonietz, Schuster, et Timpf (2013) ont proposé une méthode qui modélise l'adéquation spatiale des réseaux piétonniers pour les utilisateurs. Ce modèle évalue l'adéquation selon les caractéristiques des utilisateurs, leur environnement et les interactions entre eux. La valeur obtenue en combinant des paires de propriétés environnementales et de capacités humaines calculée par ce modèle.

Les propriétés environnementales, comme la distance de déplacement et la pente du trottoir, ont été utilisées pour évaluer l'adéquation des sentiers. Ce modèle a été mis en œuvre dans un scénario de navigation pour cinq personnes ayant des capacités différentes en ce qui concerne les pentes des segments et la présence d'escaliers. Ce modèle malgré qu'il prenne en compte le profil de l'utilisateur, mais ne prenne pas en considération les facteurs affectant l'accessibilité de déplacement multimodal.

Tajgardoon and Karimi (2015) ont proposé une approche fondée sur un modèle linéaire pondéré pour différentes caractéristiques des segments de trottoirs afin d'évaluer l'accessibilité des trottoirs pour les PFR. Ces caractéristiques comprenaient la longueur du segment, la pente, la largeur, la qualité de la surface et différentes zones de circulation sur les trottoirs comme les sentiers, zone cyclable. Ils ont développé cette approche pour simuler et visualiser l'accessibilité pour deux groupes de PMR utilisatrices des fauteuils roulants ainsi que pour les utilisateurs aveugles. Dans ce projet, seulement l'accessibilité affectant le déplacement sur les trottoirs a été analysée.

En d'autres recherches, (Neis, 2015) a introduit une nouvelle approche pour évaluer la fiabilité d'un algorithme d'itinéraire personnalisé pour les PFR qui prend en considération les restrictions et les besoins des utilisateurs de fauteuil roulant. L'approche de routage a été intégrée à un réseau, qui était basé sur une cartographie collaborative (Crowdsourcing) dérivée de la carte des rues ouvertes (OSM). Cet algorithme prend en considération les perceptions des personnes en fauteuil roulant en se basant sur une cartographie collaborative donc il ne prend pas en considération l'hétérogénéité des profils des utilisateurs qui ne sont pas tous identiques ainsi que l'aspect de multimodalité de déplacement n'était pas considéré. Finalement, (Gharebaghi, 2018) a proposé dans le projet MobiliSIG une approche basée sur les confiances d'utilisateurs qui sont considérés comme des facteurs personnels qui interagissent avec les facteurs environnementaux. Le résultat de cette interaction produit un déplacement qui peut être associé à un niveau d'accessibilité qui se change selon les confiances de l'utilisateur et les facteurs environnementaux. Des segments pondérés sont ensuite utilisés pour l'étape de calcul de l'itinéraire optimal. Dans cette étude, le niveau d'accessibilité est considéré comme la valeur de coût des segments, qui est calculée en agrégeant le niveau de confiances des utilisateurs pour se déplacer en présence des multipropriétés des segments (pente, qualité de la surface, etc.). Ce processus est réalisé sur la base de l'approche multicritère (Fuzzy-TOPSIS). Cette approche a été évaluée et testée dans la ville de Québec. Cependant, comme les autres projets similaires, l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal n'a pas été prise en compte.

#### 2.4 Applications et outils géospatiaux intégrant les algorithmes de routages

Grabener et al. (2009) utilise l'algorithme Dijkstra modifié pour créer son modèle de calcul du plus court chemin multimodal en milieu urbain. Il indique que la modélisation d'un réseau routier ou de transport en commun se fait naturellement sous forme d'un réseau de graphe pondéré en espace-temps. Ainsi, il a proposé dans son modèle que les modes de transport se modélisent séparément chacun de l'autre en dupliquant les nœuds, et ce même pour un seul mode de transport, mais plusieurs passent de la même route par exemple des bus ou trains qui passent par une route ou corridor commun. Dans son algorithme de routage, il a proposé de même d'intégrer le temps d'attente dans l'arc de transfert entre les différents modes de transports ou différents moyens.

Macharis and Bontekoning (2004) et van Nes (2002) ont présenté une stratégie de conception du réseau de transport multimodal physique basée sur le concept de réseau hiérarchique sur des niveaux dépendamment des caractéristiques du réseau, le temps de voyage pour un réseau, la longueur d'un réseau, etc. Wang et al. (2009) ont amélioré le modèle de réseau multimodal hiérarchique et décrivent la relation entre les différents niveaux en créant un graphe multimodal plug-and-play tout en proposant des transferts entre chaque niveau de réseau multimodal. Pour développer l'algorithme de routage, ils ont utilisé une analyse basée sur un seul critère, qui est le plus court chemin tout en ajoutant la dépendance de temps dans le graphe spécifiquement pour les transferts entre les modes de transport.

Au niveau des systèmes de transport en commun et dans le cadre de mesure de l'accessibilité de déplacement en utilisant ces services de transport, une méthode de mesure d'accessibilité s'appelle l'accessibilité facilitée par le système. Cette dernière mesure la capacité d'un utilisateur à se rendre à destination et tient compte du temps ou des coûts de déplacement dans le réseau de transport ou des efforts connexes pour effectuer le voyage. La façon dont le coût du voyage est déterminé dépend de la disponibilité des données et du contexte de l'application. Par exemple, (Liu & Zhu, 2004) ont calculé le temps de transit en divisant la distance par la vitesse moyenne. Les modèles plus complexes tiennent compte de facteurs comme le temps de transfert, le temps d'attente et l'information sur le calendrier des parcours de bus.

Hillman et Pool (1997) ont utilisé des temps de déplacement réalistes, des origines aux destinations, pour calculer l'accès facilité par le système. Ils ont décrit la procédure de calcul du temps de trajet comme la somme du temps de marche de l'origine à l'arrêt, du temps d'attente à l'arrêt, du temps de trajet à bord et du temps d'attente à tout échange. Ils ont

déclaré avoir utilisé des informations détaillées sur le réseau de transport public, y compris des points de chronométrage le long d'un itinéraire pour déterminer les temps cumulés pour les arrêts.

Sizer *et al.*, (2018) propose un système de simulation de planification multimodale (SUMO) dont l'algorithme de routage entre arrêts de transports en commun est le plus complexe : en partant du principe de routage, un graphe des transports en commun est créé, comprenant toutes les liaisons d'embarquement et de descente aux arrêts, toutes les liaisons d'arrêt à arrêt de toutes les lignes de transport en commun et tous les échanges possibles entre lignes aux arrêts. Les coûts de liaison associés sont affectés comme suit : le coût des liaisons d'accès aux arrêts correspond au temps d'attente moyen respectif (la moitié du temps d'avancement d'une ligne) ; le coût des liaisons point à point correspond au temps de parcours du véhicule de transport en commun en temps de libre circulation ; le coût des liaisons de correspondance correspond au temps de marche nécessaire d'un arrêt à l'autre et au temps d'attente pour attendre la ligne suivante. Une fois le graphe des transports publics défini, l'algorithme de Dijkstra identifie la séquence de liaisons de transports publics qui minimise le temps de trajet (moyen).

Choosumrong, Raghavan, et Bozon (2012) ont développé un outil de calcul d'itinéraire qui optimise le temps de trajet minimum entre le lieu de l'accident et l'hôpital le plus proche en prenant en compte d'autres paramètres tels que la disponibilité des lits dans l'hôpital ciblé et l'état du patient. Il s'agit d'une planification des itinéraires d'urgence multicritères. Il a utilisé une méthode basée sur l'adaptation de l'algorithme pgRouting en implémentant l'algorithme Dijkstra modifié avec un processus de hiérarchie analytique (AHP) pour la planification d'un itinéraire d'urgence (ERDP).

Le projet Wegoto (Morcou, et al., 2013), développé en France par le laboratoire AGIM de l'université de Grenoble. Il s'agit d'une application mobile d'aide à la navigation pour des personnes de différents profils de mobilité comme : piéton, fauteuil roulant manuel, fauteuil roulant électrique, malvoyant, personne âgée en situation de mobilité réduite. Ce système permet aux utilisateurs de fauteuil roulant de planifier un déplacement multimodal incluant les transports en commun. Malgré le guidage et navigation en déplacement multimodal, cette application n'offre pas un itinéraire personnalisé selon le profil de chaque utilisateur.

En plus des projets de recherches, il existe plusieurs applications cartographiques commercialisées qui utilisent des algorithmes de calcul d'itinéraires. Nous nous intéressons aussi aux données qu'elles utilisent pour calculer les itinéraires. D'abord, nous exposons les applications telles que Google Maps, Waze et Streetco qui sont tous basés sur des algorithmes de routage différents selon le besoin et les fonctionnalités.

Waze<sup>6</sup> est une application de navigation GPS participative. Elle permet aux utilisateurs de partager les informations sur le trafic, conditions de route, accidents, etc. Pour calculer le chemin optimal, Waze se base sur les historiques de vitesses, les feux de circulation, les arrêts, les limites vitesses, les embouteillages en temps réels, les travaux de construction, les heures de pointe tels que les fins de journée et les fins de semaine.

Streetco<sup>7</sup> est une application mobile, développée en France, dédiée aux personnes à mobilité réduite en situation de handicap. Cette solution propose un itinéraire accessible selon le profil de l'utilisateur. Il s'agit d'un système basé sur le concept de GPS collaboratif (Crowdsourcing) adapté aux déplacements des différents profils des utilisateurs. Streetco permet aux participants de signaler un obstacle ou de référencer un lieu accessible en utilisant la position et la caméra de l'appareil mobile. Cette application permet également d'afficher les arrêts de bus accessibles comme des points d'intérêts, mais il est utilisé seulement pour les milieux piétonniers et n'offre pas la possibilité de se déplacer en choisissant divers modes de transport.

---

<sup>6</sup> <https://www.waze.com/fr/waze>

<sup>7</sup> <https://fr.street-co.com/app>

Système	Fonctionnalités	Limites
Google Maps	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une application très pertinente pour le guidage et navigation, elle offre un guidage en temps réel et planifie les parcours en Bus, voiture, Train, Vélo ou marche en proposant le chemin le plus court pour le trajet à planifier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne propose pas des itinéraires offrant des arrêts et parcours accessibles selon le profil utilisateur.</li> </ul>
U-Acces	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cet outil facilite la navigation des piétons aux capacités différentes et fournit un outil de pré-planification pour un voyage en utilisant l'itinéraire le plus court possible comme critère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cet outil n'offre pas un guidage en déplacement multimodal accessible, il se limite sur le réseau piétonnier.</li> </ul>
WheelMap	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partager l'information sur l'accessibilité des lieux publics pour les personnes qui se déplacent en fauteuils roulants à travers des points d'intérêts portant des photographies et commentaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette application n'offre pas la fonction de navigation. Donc pas de possibilité de planifier un parcours pour aller à un lieu quelconque.</li> </ul>
Waze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une application de navigation qui permet également aux utilisateurs de signaler ces événements en temps réel afin que les autres utilisateurs puissent les éviter. En effet, les utilisateurs peuvent également signaler des événements tels que des embouteillages, des accidents, des radars, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette application ne propose pas de déplacement multimodal nativement. Il ne prend pas en compte les autres modes de transport tels que les transports en commun ou la marche ou autres.</li> </ul>
Handimap	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S'adresse aux collectivités, services de transport et offices de tourisme pour leur permettre de communiquer efficacement sur l'accessibilité de leur territoire. Cette application conçoit des cartes mises à jour et propose un système de calcul d'itinéraires adaptés à chaque type de handicap.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cette application n'offre pas la possibilité aux personnes en fauteuil roulant de planifier des trajets tout en adoptant les modes de transports adaptés pour leurs profils. Elle offre des cartes interactives à propos l'accessibilité et pas de système de guidage en déplacement multimodal.</li> </ul>

Tableau 4 : Limites des outils existants pour le déplacement multimodal des PFR

D'après ce qui précède, tous les systèmes et projets élaborés pour offrir un outil de guidage et de planification d'itinéraires ont développé des fonctions de routage qui soit ne proposent pas un outil de planification en déplacement multimodal et personnalisé en même temps selon le profil de l'utilisateur soit ne prennent pas en considération le profil de l'utilisateur et ses capacités par rapport aux facteurs environnementaux affectant son accessibilité. Prenant l'exemple de MobiliSIG qui propose un itinéraire accessible selon le profil de l'utilisateur, mais il n'offre pas la possibilité de déplacement multimodal vu le manque des facteurs environnementaux dans le contexte de déplacement multimodal et l'algorithme de routage qui propose un déplacement multimodal et accessible selon le profil de l'utilisateur en même temps.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord abordé les différentes notions et concepts de base liés à la problématique de recherche. Ensuite, nous avons étudié les outils de mesure de l'accessibilité de l'environnement. La majorité des outils présentés dans la revue littérature utilisent les perceptions des personnes en interaction avec les facteurs environnementaux pour mesurer l'accessibilité de déplacement. De ce fait, la recherche des facteurs environnementaux est nécessaire pour la mesure de l'accessibilité de déplacement pour les personnes en fauteuil roulant. Finalement, nous avons présenté des outils et applications d'aides à la planification et navigation utilisant les algorithmes de routages ce qui nous a identifié les limites et avantages de ces outils et nous a permis de concevoir une idée sur les besoins et méthodologies pour développer notre système.

## **Chapitre 3 : Identification des facteurs environnementaux affectant l'accessibilité dans un contexte de déplacement multimodal**

L'approche conceptuelle de mesure de l'accessibilité de déplacement est basée sur l'interaction des facteurs personnels avec les facteurs environnementaux. Cette interaction résulte un déplacement qui sera évalué par une méthode de mesure de l'accessibilité qui produit des indices d'accessibilité. Ces indices vont être implémentés dans un algorithme de routage qui prend en considération les profils d'utilisateurs pour proposer un itinéraire multimodal accessible pour les personnes en fauteuil roulant.

Le problème dans cette étude revient à la détermination des facteurs environnementaux. Malgré les concepts établis par les différentes études qui ont pour but d'améliorer l'accessibilité pour tous et améliorer les conditions environnementales afin de réduire les obstacles, l'accessibilité aux transports publics reste encore une problématique pour certains utilisateurs de fauteuil roulant manuel. En effet, ce service peut connaître divers enjeux étant donné les profils des utilisateurs différents qui devraient être pris en considération, l'augmentation des nombres des arrêts accessibles pour les personnes en fauteuil roulant, l'amélioration des conditions de montée à bord et de descente des moyens de déplacement, l'intégration de la conception sans obstacle selon un principe de conception universelle à l'ensemble des processus de réalisation des futurs services, etc.

### 3.1 Facteurs affectant l'accessibilité pour un déplacement multimodal

Pour les personnes se déplaçant en fauteuil roulant, un déplacement en transport public implique deux différents déplacements, dans les voies piétonnières (trottoir, liens piétonniers...) et au bord d'un autobus. Le premier doit répondre aux exigences de l'accessibilité dans le cheminement piétonnier et les zones d'arrêts (arrêts de bus) et le deuxième au niveau de montée/ descente et au bord de bus.

### 3.1.1 Recherche des facteurs affectant l'accessibilité des chemins piétonniers, zones d'arrêts et accès à bord de transport en commun

#### I. Cheminement piétonnier

Le réseau de transport de la capitale (RTC), en se basant sur le guide de l'accessibilité pour l'environnement bâti réalisé par l'association de la normalisation canadienne et guide de design en infrastructure<sup>8</sup>, analyse l'accessibilité pour une zone d'arrêt en analysant l'accessibilité de cheminement piétonnier à partir de la zone d'arrêt jusqu'à la première intersection/passage piétonnière avec la route et particulièrement le bateau pavé qui assure le déplacement de la route vers le trottoir et vice-versa.

Selon le guide de Design RTC établi en 2018, pour qu'un arrêt soit accessible, il doit remplir des critères et spécifications telles que : Présence d'un trottoir ; Hauteur du trottoir : 12 - 17 cm ; Pente latérale du trottoir : max. 4% ; Pente transversale du trottoir : max 5% ; Surface libre d'obstacle dans la zone d'embarquement : 2 m X 2 m (tolérance de ±0,1 m) et pour le chemin piétonnier : présence d'un trottoir, largeur minimale du trottoir : 1,5 m (tolérance jusqu'à min. 1,2 m ponctuellement sur le cheminement), pente latérale du trottoir : max. 4% ; pente transversale du trottoir : max 5 %, présence d'un bateau pavé à chaque extrémité du trottoir : en bon état, perceptible sans dépasser 20 cm de hauteur, pente de la transition chaussée-trottoir : max 15 % ; État de la surface du trottoir : aucun trou ou fissure d'une largeur/profondeur > 2 cm. La Figure 5 présente un exemple d'arrêt accessible selon les critères de RTC.

---

<sup>8</sup> [https://cdn.rtcquebec.ca/sites/default/files/2019-07/Guide\\_Design\\_Infrastructure\\_RTC.pdf](https://cdn.rtcquebec.ca/sites/default/files/2019-07/Guide_Design_Infrastructure_RTC.pdf)

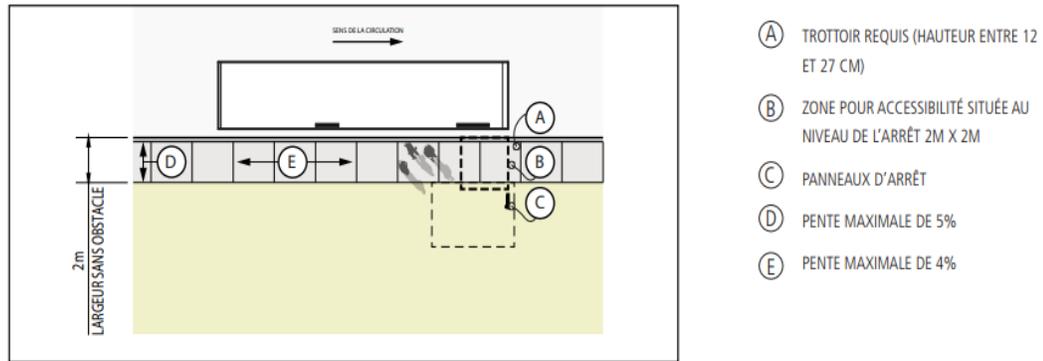


Figure 5 : Exemple de mesures nécessaires pour l'analyse de l'accessibilité de l'environnement d'un milieu piétonnier

Source : (Guide Design infrastructure RTC, 2018)

Une voie piétonnière accessible selon les normes canadiennes de la conception accessible de l'environnement bâti (Association canadienne de Normalisation, 2019) doit satisfaire certaines exigences soit une largeur de minimum 1600 mm ou 1350 mm près d'un bateau pavé de trottoir, la pente dans le sens de circulation doit être au maximum 1 :20 (5%) et entre 1 :15 (6,66 %) et 1 :10 (10 %) dans le cas d'un bateau pavé de trottoir et une pente transversale d'au plus 1 :50, c'est-à-dire 2%. La surface des voies de trottoir et bateau pavé doit être stable, ferme et antidérapante. Les bateaux pavés, doivent être de pente entre 6,66 % et 10% et de largeur la même que celui de trottoir et guident les piétons directement vers le passage qui leur est réservé c'est-à-dire à chaque intersection, il convient un bateau pavé de trottoir comme illustré dans la Figure 6. Les boutons d'appels aux traverses de piétons doivent être sur un poteau, à une hauteur de 1100 mm  $\pm$  150 mm de la surface de la voie piétonnière. En outre, la durée de l'intervalle nécessaire aux piétons pour traverser l'intersection doit être calculée selon une vitesse de marche des piétons d'au plus 1,1 m/s en tenant compte de la longueur totale de la traverse.

Les types d'intersections sont d'une importance primordiale pour les personnes se déplaçant en fauteuil roulant. En effet, d'après une étude au Danemark, les personnes âgées ou/et à mobilité réduite préfèrent les passages pour piétons et les intersections à signalisation réglementée, ils se sentent dans un gros danger lorsqu'elles traversent la route où ces installations sont manquantes (Bernhoft & Carstensen, 2008). D'autres études liées ont identifié parmi les besoins de ces personnes des passages sûrs pour les usagers qui assurent

leurs passages en toute sécurité dans les intersections routières (Bernhoft and Carstensen, 2008); (Svensson & Rydström, 2004))

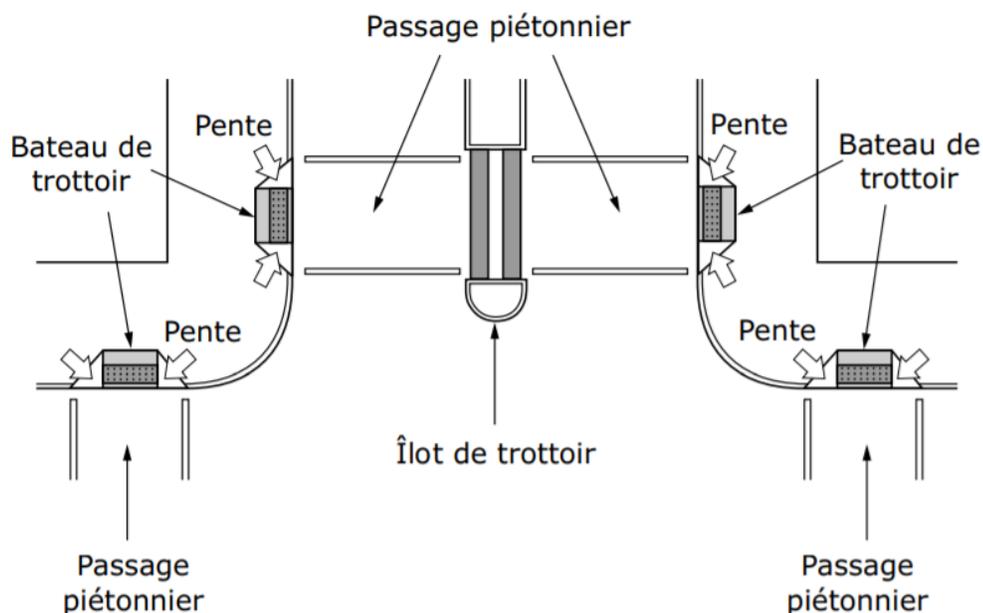


Figure 6 : Exemple de mesures nécessaires pour l'analyse de l'accessibilité de l'environnement d'un milieu piétonnier

Source : (Association canadienne de la normalisation, 2019)

Un autre guide au Québec qui vise l'amélioration de l'accessibilité des environnements bâtis liés aux transports en commun est le « Guide des besoins des personnes ayant des limitations fonctionnelles en matière de transport en commun » qui est élaboré par le Regroupement des usagers du transport adapté et accessible de l'île de Montréal (Ruta, 2010). Ce guide soutient l'inclusivité de la ville de Montréal et provient d'une large consultation auprès des citoyennes et citoyens directement concernés. Ce guide est un outil pratique qui recense les besoins exprimés par les usagers ayant différentes limitations fonctionnelles et qui utilisent le transport en commun régulier, des groupes des personnes concernées ont été interrogés sur les traverses piétonnières ont montré leurs peur et stress quand ils traversent les intersections piétonnières comme dans ce témoignage :

« Au coin de ma rue, j'ai peur de traverser. On m'a appris à ne pas traverser quand il y a la « main » (pictogramme), mais je n'ai pas le temps de me rendre de l'autre côté et il y a déjà la main! Je ne sais pas si je dois revenir sur mes pas ou continuer ».

D'après le Manuel Canadien de la signalisation routière, les types d'intersections sont catégorisés en 3 types : 1) Intersection ayant une bretelle d'accès sans arrêt, qui doit comporter un dispositif de régulation du trafic conforme au Manuel canadien de la signalisation routière, comme « CÉDEZ le passage aux piétons » ou une traverse de piétons munie de feux et d'un bouton d'appel accessible; 2) Intersections à panneaux indicateurs ; 3) intersection munie de feux et d'un bouton d'appel accessible.

Pour changer le mode de déplacement vers les transports en commun, il est nécessaire de passer par une zone d'arrêt. Cette zone d'arrêt doit être accessible selon les normes du RTC pour que la personne en fauteuil roulant soit admissible à prendre un parcours.

## II. Les zones d'arrêts

Selon une recherche de l'Institut national suédois de recherche sur les routes et les transports (VTI,2012) aux pays scandinaves (Suède, Danemark, Norvège), certains facteurs ont été identifiés pour améliorer l'accessibilité aux services de transports en commun pour les personnes à mobilité réduite et personnes âgées. Dans cette étude, les zones d'arrêts avec un abri contre le vent, un éclairage et un banc à l'arrêt de bus et sur le chemin de l'arrêt de bus sont parmi les facteurs identifiés.

Dans une autre recherche dans le cadre de projet « Ethnographie du handicap dans la ville de Québec » réalisé par le postdoctorant Juan Mansila dont les participants à la recherche appartiennent à deux catégories différentes : individus ayant des incapacités motrices de 18 ans et plus et couvrant un spectre large d'âges (majeurs aptes) et genre ; intervenants liés au milieu du handicap moteur (responsables d'associations du milieu du handicap, représentants du RTC-Québec).

Dans cette recherche, la collecte des données –auprès des individus (environ 25) ayant des incapacités motrices de 18 ans et plus et couvrant un spectre large d'âges et genre– sera effectuée à partir d'une stratégie d'ethnographie multisites: observation participante, participation active, entretiens narratifs, enquêtes sur leurs profils sociodémographiques et des ateliers sur la (re)construction de leurs expériences urbaines de mobilité –à l'aide de techniques de storytelling (photo, vidéo).

Cette étude a pour but d'étudier le concept de communautés saine et inclusive qui s'appuie sur les pratiques, les espaces et infrastructures « perçues » comme nécessaires et/ou

suffisantes par les participants pour tisser des liens sociaux et une expérience urbaine de mobilité inclusive. Lors des entrevues avec des personnes ayant des incapacités motrices pour exprimer leurs perceptions vis-à-vis les transports en commun. L'un des participants souligne :

« Parfois je décide de prendre le 800, mais il y a déjà quelqu'un en chaise roulante, on ne peut pas savoir ».

Un autre a ajouté : « Je vois que le bus est plein et demander aux gens de se pousser alors qu'il n'y a pas de place. Cela me gêne »

Ces deux réponses montrent que l'achalandage dans les bus est parmi les facteurs qui affectent l'accessibilité de ces personnes aux services de transports en commun. Il souligne également l'importance d'avoir accès à l'information sur l'occupation dans le bus.

Une autre réponse reçue dans le cadre de ces entrevues parle de la difficulté d'attendre le bus dans une zone d'arrêt en manque de l'abribus surtout en hiver :

« Pendant l'été ça va, on peut se permettre d'attendre, mais l'hiver sans un arrêt couvert, hors de question ».

En outre, selon le guide de Conception accessible pour l'environnement bâti (Association canadienne de Normalisation, 2019), la zone d'embarquement et de débarquement de transport en commun doit offrir à chaque point d'embarquement destiné aux passagers utilisant un fauteuil roulant une longueur libre d'au moins 2400 mm, mesurée perpendiculairement à la bordure ou à la voie de circulation des véhicules, une largeur libre d'au moins 1500 mm mesurée parallèlement à la voie de circulation des véhicules, doit avoir une pente d'au plus 1:50 (2 %), l'abribus s'il y a lieu doit avoir une superficie de plancher libre d'au moins 1700 × 1700 mm directement dans l'entrée de porte et doit être de niveau avec la voie accessible . En effet, en se basant sur le guide des besoins des personnes ayant des limitations fonctionnelles en matière de transport en commun élaboré par l'association RUTA à la ville de Montréal, plusieurs points à recommander pour les services de transport en commun tels que cités dans le tableau suivant :

	<b>Des facteurs pour améliorer l'accessibilité aux services de Transport en commun pour les personnes ayant des déficiences motrices</b>
1	Repérer l'arrêt et l'autobus souhaités, en particulier lorsque plusieurs lignes desservent un arrêt
2	Les chauffeurs de bus doivent circuler de façon sécuritaire à l'arrêt
3	L'arrêt ne doit pas être situé sur pente
4	Il doit y avoir un banc à chaque arrêt
5	Un espace libre et suffisant est nécessaire pour une personne en fauteuil roulant, à côté du banc et autour du trottoir surtout dans les heures de l'achalandage
6	L'arrêt doit être éclairé et entretenu
7	Trouver, dans le Planibus, l'information liée à l'accessibilité des véhicules en fonction de l'horaire, et ce, même si tous les véhicules de ce circuit sont accessibles
8	Trouver, dans le Planibus (affiche informationnelle dans les arrêts de bus), l'information liée à l'accessibilité de l'arrêt d'autobus (avec ou sans aide, selon l'inclinaison de la rampe)
9	Trouver à l'avance, à la station et à l'arrêt d'autobus, l'information concernant le déplacement de l'arrêt ou un détour planifié
10	Trouver, dans la station, l'information mise à jour régulièrement sur les travaux aux aménagements facilitant les déplacements
11	L'importance de l'abribus surtout pour pouvoir attendre l'autobus quelles que soient les conditions météo et pour ceux qui font leurs voyages en dehors des heures d'achalandage. De ce fait, les usagers ayant des déficiences motrices ont tous exprimé leurs besoins pour l'abribus, parmi leurs témoignages : « On s'y sent en sécurité, protégé des interactions entre les piétons et les cyclistes. On y est aussi à l'abri des intempéries (pluie, vent, neige) »,
12	L'arrêt doit être déneigé et déglacé en tout temps, sur tout l'espace dont l'autobus s'arrête.

Tableau 5: Certains facteurs pour améliorer l'accessibilité aux services de transports en commun pour les personnes à déficiences motrices selon le guide de (RUTA,2010)

Plusieurs facteurs personnels liés à la perception et témoignage des personnes avec des limitations fonctionnelles incluant ceux ayant des incapacités motrices ont été soulevés. Ces perceptions sont différentes d'un à autre selon sa capacité (par exemple le type de limitation), sa confiance, sa personnalité, etc. La sécurité est l'un des points importants témoignés par les différents groupes interrogés d'après l'étude élaborée par l'association RUTA à la ville de Montréal.

De ce fait, ils ont tous exprimé leurs besoins de se sentir bien et en sécurité en attendant l'autobus et en circulant à la zone d'arrêt.

### III. Manœuvre de montée/descente et à bord de l'autobus

Pour changer le mode de déplacement et prendre un moyen de transport en commun comme l'autobus à la ville de Québec, il faut passer par une zone d'arrêt. Dans la section précédente, nous avons parlé des facteurs affectant l'accessibilité de cheminement piétonnier et les zones d'arrêts, dans cette section nous allons parler sur les facteurs qui en affectent les manœuvres d'embarquement et débarquement aux véhicules de transport en commun et à bord de l'autobus.

L'accessibilité aux véhicules de transport en commun pour les personnes en fauteuil roulant peut-être composées de deux étapes monter/descendre l'autobus et s'installer à bord de véhicule.

Dans le guide de (RUTA, 2010), certains points importants exprimés par les usagers des services de transport en commun ayant des limitations fonctionnelles à travers des perceptions et témoignages de ces groupes de personnes interrogées ont été soulevés. Ces points ont été recommandés aux sociétés de transport en commun dans ce guide.

Commençant par l'opération de montée/descendre de l'autobus, les points qui ont été jugés importants sont les suivants : 1) L'espace sur le trottoir doit être suffisant pour déployer la rampe et permettre la manœuvre autour de l'espace requis pour la rampe et il faut éviter les obstacles, tels que: poteau, borne fontaine, boîte à lettres dans cet espace 2) La rampe d'accès pour monter dans l'autobus doit avoir une pente suffisamment douce pour qu'une personne se déplaçant en fauteuil roulant manuel puisse l'utiliser de façon autonome (pente d'au plus 1:12 , 8.33 %) 3) La rampe doit pouvoir supporter une charge importante et doit être assez

large pour le passage du fauteuil roulant d'une personne obèse 4) Les usagers doivent être informés du fonctionnement du déploiement de la rampe à l'avant ( voir figure 7 Autobus avec une rampe déployée) , ils doivent comprendre le système pour monter/descendre ; la procédure doit être donc simple et standardisée 5) Une signalisation claire et simple, à hauteur des yeux, doit indiquer la procédure à suivre pour monter/ descendre 6) Une main courante est requise pour monter dans l'autobus, pour ne pas avoir à se tenir au pourtour de la porte 7) Un poteau et une main courante sont requis à proximité du chauffeur. La main courante doit être à une hauteur qui permette de se tenir confortablement 8) Le revêtement de la rampe doit être antidérapant 9) Recevoir des instructions pour toute situation inhabituelle (arrêt loin du trottoir, travaux de voirie). À ce propos, il est important de signaler que le chauffeur doit prendre le temps d'expliquer pourquoi l'autobus n'utilise pas le chemin habituel et donner les consignes concernant le détour, sa longueur, les arrêts possibles et comment faire pour se rendre à destination ainsi que le chauffeur doit s'assurer que l'usager a bien compris. De ce fait, la formation des personnels des services de transport en commun surtout les chauffeurs des bus est nécessaire.

Pour bien s'installer à bord de l'autobus selon le Guide de (RUTA, 2010), il faut que le véhicule soit stable, doté d'une suspension souple et le mécanisme d'ouverture de la fenêtre doit être à une hauteur adéquate et facile à manipuler. En plus, la personne se déplaçant en fauteuil roulant ou en quadriporteur doit avoir la possibilité de s'installer adéquatement afin de ne pas basculer en cas d'arrêt brusque. Cependant, le style de conduite des chauffeurs des transports en commun est important pour la sécurité des usagers. En outre, la place réservée aux personnes se déplaçant en fauteuil roulant doit offrir un espace libre et suffisant pour le chien d'assistance, une fois qu'elles ont pris place.

Après avoir utilisé les services de transport en commun, certains usagers ont exprimé leurs besoins de rétroactions sur les services offerts. En effet, certains usagers doivent connaître l'information requise par le transporteur pour la formulation d'une Plainte (heure de l'incident, no de ligne, nom du chauffeur, etc.) afin de savoir ce qu'il faut noter en cas de situation problématique.



Figure 7 : Exemple de déploiement de la rampe d'accès

### 3.1.2 Classification des facteurs selon la hiérarchie de modèle MDH-PPH et méthodologie de sélection de la liste finale des facteurs à considérer

Dans le modèle MDH-PPH les facteurs sont catégorisés comme personnels et environnementaux. Les facteurs environnementaux de leurs parts sont caractérisés comme physiques ou sociaux dans le modèle MDH-PPH (Fougeyrollas, 2010, 1998). Pour bien positionner les facteurs cités dans le paragraphe (2.3.1) en sous-groupes selon la hiérarchie proposée par le modèle MDH-PPH de façon à classifier ces facteurs en environnementaux physiques, sociaux, personnels, etc. (Lizotte & Fougeyrollas, 1997). Nous proposons le tableau 6 qui est un résumé de la classification en différentes catégories des facteurs personnels et environnementaux selon leurs natures et classes (physique, social, politique, etc.).

Description de Facteur	Catégorie
La pente de la rampe d'accès à l'autobus, surface suffisant pour le déploiement	Environnementaux-physique, aménagement
Qualité de surface de la rampe d'accès	Environnementaux-physique, aménagement
Pente longitudinale et transversale de la voie piétonne	Environnementaux-physique, aménagement
Présence/absence abribus	Environnementaux-physique, aménagement
Informations et explications sur la procédure de monter/descendre l'autobus	Facteurs socioculturels, réseau social
Banc à chaque arrêt avec un espace libre près du banc pour les personnes en fauteuil roulant	Environnementaux-physique, aménagement
Planibus pour les arrêts pour diffuser les informations liées aux trajets et accessibilité, horaires et parcours accessibles et les détours	Environnementaux-physique, aménagement
Politique de déneigement des arrêts	Sociaux, politico-économique
Repérage de l'arrêt	Environnementaux-physique, aménagement
Conditions climatique	Environnementaux-physique, climat
Normes des signalisations	Sociaux, politico-économique
Main courante pour aider à monter en Autobus	Environnementaux physiques, aménagement
Poteau et main courante en Autobus	Environnementaux physiques, aménagement
Style de conduite des chauffeurs	Facteurs socioculturels, règles sociales
Stabilité et état de bus	Environnementaux-physique, aménagement
Achalandage et disponibilité des sièges	Facteurs socioculturels, règles sociales
Services rétroactions	Environnementaux-physique, aménagement
Capacités	Personnel, aptitudes
Sentiments de sécurité, inquiétude, mal à l'aise	Personnel, aptitudes

Tableau 6 : Classification des facteurs environnementaux, personnels identifiés dans notre recherche qui affectent l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal.

Après l'identification des facteurs qui pourront affecter le déplacement multimodal, certains facteurs environnementaux qui peuvent toucher l'environnement physique lors de déplacement des personnes en fauteuil roulant ont été choisis pour notre projet selon une méthodologie permettant la quantification de ces facteurs et le choix des questionnaires et facteurs ou paramètres affectant l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal comme illustré dans la figure 8 :

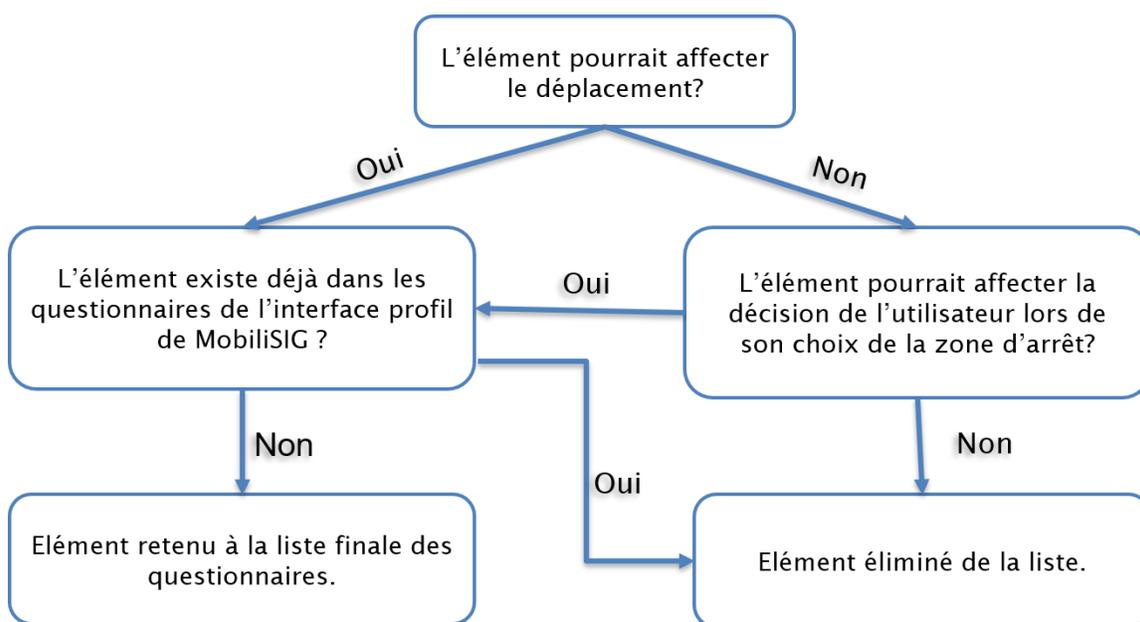


Figure 8 : Méthodologie adoptée pour le choix de la liste finale des facteurs

Finalement, une liste des paramètres a été retenue en appliquant la méthodologie de sélection et des questionnaires élaborés pour la création de l'interface profil utilisateur.

Question	Paramètres associés	Confiance de 0 à 100
Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans <b>abribus</b> ?	Abribus	
Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans <b>Planibus</b> ?	Planibus	
Quel est votre niveau de confiance à monter et descendre du bus avec une <b>rampe d'accès</b> de plus de 8.33 % ou 1 :12 ?	Le déploiement de la rampe d'accès	
Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre du bus d'une <b>zone d'embarquement et de débarquement</b> de longueur libre de moins de 2.4m et de largeur de moins 1.5m ?	La zone d'embarquement et de débarquement	
Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans une zone d'arrêt <b>achalandée</b> ?	L'achalandage des zones d'arrêts	

Tableau 7 : Questionnaire à ajouter dans l'interface du profil d'utilisateur de MobiliSIG pour calculer l'accessibilité d'itinéraire en déplacement multimodal

### 3.2 Conclusion

Dans ce chapitre, une recherche approfondie sur les facteurs environnementaux affectant l'accessibilité de déplacement multimodal pour les personnes en fauteuil roulant mène à retenir une liste des éléments et définir des questions liées à ces éléments. En effet, ces questionnaires seront ajoutés aux autres questions existantes dans MobiliSIG pour but de définir le profil de chaque utilisateur en calculant l'indice d'accessibilité pour chaque segment du réseau de déplacement selon le profil de cet utilisateur et en développant un algorithme de routage qui prend en considération ce profil. Ceci va nous guider au prochain chapitre qui aura pour but de chercher une méthode d'estimation de l'accessibilité de déplacement.

## **Chapitre 4 : Estimation de l'accessibilité dans le contexte de déplacement multimodal et développement de l'algorithme de routage**

Après avoir identifié les facteurs environnementaux affectant l'accessibilité au déplacement multimodal, une approche basée sur les confiances des utilisateurs est utilisée pour calculer l'indice d'accessibilité selon le profil de l'utilisateur puis un algorithme de routage sera adapté en fonction de l'accessibilité de l'itinéraire en proposant un chemin multimodal commençant par le déplacement piétonnier en passant au déplacement en transport en commun dans le cas de la ville de Québec. Pour ce faire, le profil utilisateur devrait être rempli par l'utilisateur selon leurs confiances par rapport aux différents questionnaires associés aux facteurs environnementaux puis une méthodologie de mesure de l'indice d'accessibilité sera utilisée. En effet, plusieurs méthodologies présentées dans le chapitre de revue littérature tels que (Tajgardoon & Karimi, 2015; Beale et al., 2006; Jonietz et al., 2013; Neis, 2015) qui étudient la mesure de l'accessibilité de déplacement en tenant compte des perceptions et profils de l'utilisateur en offrant des itinéraires personnalisés. En outre, (Gharebaghi, 2018) a appliqué l'approche de logique floue qui prend en compte la perception et les capacités des utilisateurs de fauteuil roulant manuel pour évaluer l'accessibilité du réseau piétonnier pour les personnes qui utilisent un fauteuil roulant manuel dans leurs activités quotidiennes. Le processus d'évaluation de l'accessibilité dans cette approche se fait principalement en quatre étapes : 1) rassembler les informations sur le profil de l'utilisateur, 2) lier les propriétés du segment aux confiances de l'utilisateur correspondantes, 3) agréger les niveaux de confiance pour chaque segment, et enfin, 4) évaluer le niveau d'accessibilité de chaque segment en fonction de la confiance totale.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer la méthode de logique floue pour la mesure de l'indice d'accessibilité de déplacement et finalement un algorithme de routage sera personnalisé en proposant un déplacement multimodal accessible selon le profil de l'utilisateur.

### 4.1 Profil des utilisateurs selon les perceptions et la confiance

Pour évaluer l'accessibilité dans le contexte de déplacement, une approche basée sur la confiance des utilisateurs a été établie dans le projet de MobiliSIG, cette approche qui s'appelle WheelCon est l'une des approches les plus fiables pour évaluer les capacités des utilisateurs de fauteuil roulant. Dans cette approche, le niveau de confiance de l'utilisateur pour réaliser une tâche de mobilité en présence d'un obstacle est évalué et exprimé en utilisant une valeur comprise entre 0 (faible confiance) et 100 (confiance élevée), (Rushton et al., 2011). La figure 9 présente un exemple des questionnaires de WheelCon.

Actuellement, quel est votre niveau de confiance à....	Confiance (0-100)
1. Vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur du tapis?	
2. Vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel entre les meubles dans votre maison?	
3. Vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel par-dessus des seuils, par exemple entre deux pièces?	
4. Manœuvrer votre fauteuil roulant manuel dans des espaces restreints, comme une salle de bains?	
5. Vous transférer de votre fauteuil roulant manuel à <b>votre</b> lit?	
6. Vous transférer de votre fauteuil roulant manuel à <b>votre</b> toilette?	
7. Vous transférer de votre fauteuil roulant manuel à l'intérieur de <b>votre</b> baignoire (y compris l'utilisation de sièges de bain) OU à utiliser votre chaise d'aisance pour entrer dans votre cabine de douche?	
8. Vous transférer du sol à <b>votre</b> fauteuil roulant manuel par vous-même?	
9. Vous transférer de votre fauteuil roulant manuel à <b>votre</b> voiture (incluant automobile, camionnette, camion, etc.)?	
10. Vous préparez un repas simple tout en utilisant votre fauteuil roulant manuel?	
11. Transporter un breuvage chaud en vous déplaçant en fauteuil roulant manuel?	
12. Conduire votre fauteuil roulant manuel pour franchir une porte qui s'ouvre automatiquement?	
13. Ouvrir, franchir, puis fermer une porte standard légère (sans mécanisme de fermeture à ressorts) de 81 cm (32 pouces)?	
14. Ouvrir et franchir une porte munie d'un mécanisme de fermeture à ressorts, comme une porte d'entrée à votre centre d'achat local?	
15. <b>Monter</b> avec votre fauteuil roulant manuel une rampe d'accès standard construite selon les normes (inclinaison de 5°)?	

Figure 9 : Forme de questionnaire de (WheelCon, 2011)

Dans le projet de MobiliSIG, une interface profil utilisateur (voir figure 10) a été créée à partir de quelques questionnaires de WheelCon pour définir les capacités de l'utilisateur par rapport aux facteurs environnementaux dans un contexte de déplacement sur le réseau piétonnier seulement.

Évaluez votre niveau de confiance entre 0 à 100% (WheelCon)

1. Quel est votre niveau de confiance à monter avec votre fauteuil roulant manuel une <b>pente</b> abrupte lorsque la surface est sèche (inclinaison > à 5°)?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
2. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur un trottoir <b>pavé, crevassé et inégal</b> ?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
3. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur un trottoir couvert de 5 cm (2 pouces) de <b>neige</b> ?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
4. Quel est votre niveau de confiance à franchir avec votre fauteuil roulant manuel un <b>trou</b> plus large que votre fauteuil roulant manuel et de 5 cm (2 pouces) de profondeur?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
5. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur une distance de 3 m (10 pieds) sur un terrain plat couvert de <b>gravier non tassé</b> ?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
6. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur une distance de 3 m (10 pieds) sur un <b>terrain plat, gazonné, sec et fraîchement coupé</b> ?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
7. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur un chemin ou un sentier de terre comportant quelques <b>racines d'arbre et des pierres</b> ?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
8. Quel est votre niveau de confiance à descendre avec votre fauteuil roulant manuel un trottoir d'une <b>hauteur standard</b> de 15 cm (6 pouces) sans trottoir abaissé ou bateau-pavé?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
9. Quel est votre niveau de confiance à monter avec votre fauteuil roulant manuel un trottoir d'une <b>hauteur standard</b> de 15 cm (6 pouces) sans trottoir abaissé ou bateau-pavé?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
10. Quel est votre niveau de confiance à traverser une rue, où la circulation est faible, à une traverse piétonnière dépourvue de <b>feux</b> de circulation?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
11. Quel est votre niveau de confiance à manœuvrer votre fauteuil roulant manuel afin d'appuyer sur le bouton d'appel de <b>feux</b> pour piétons et traverser la rue avant que les feux ne changent?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>
12. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel dans une <b>foule</b> sans heurter quelqu'un?	<input type="text"/>	<input style="border: 1px solid #00a651; color: white; padding: 2px 5px; font-size: 0.8em; font-weight: bold; border-radius: 3px;" type="button" value="?"/>

Figure 10 : Interface profil utilisateur dans l'application MobiliSIG

Source : <http://mostafavi-02.ffgg.ulaval.ca/msig6/index.html>, consulté le 17/01/2023

Cette interface permet à l'utilisateur de définir son profil d'utilisateur, il s'agit des questionnaires et les réponses seront sous forme des valeurs de 0 à 100. Ces questionnaires sont tous liés aux facteurs environnementaux affectant l'accessibilité de déplacement en fauteuil roulant dans un milieu piétonnier urbain.

Quelques facteurs affectant le déplacement multimodal ne sont pas présents dans ces questionnaires. Du coup, l'ajout des autres questions qui ont été préparées dans le chapitre précédent visant l'accessibilité aux zones d'arrêts de bus, tels que la présence d'abribus, le

déplacement dans les heures d'achalandage, etc... sont nécessaire pour la mesure de l'accessibilité dans un contexte de déplacement multimodal.

#### 4.2 Addition des niveaux de confiance pour se déplacer en fonction des paramètres établis pour un segment de trajet

Une approche basée sur la confiance des utilisateurs a été établie pour le calcul de l'indice d'accessibilité dans le milieu urbain pour les personnes en fauteuil roulant. L'évaluation d'accessibilité des itinéraires se fait en première étape par l'addition des niveaux de confiance pour chaque segment par rapport à sa propriété.

$$A_{ijl} = \sum_{p=1}^n Con_{ijp}$$

\*  $A_{ijl}$  est l'indice d'accessibilité du segment  $j$  pour la personne  $i$  selon le type de déplacement  $l$ .

\*  $Con_{ijp}$  est le niveau de confiance de la personne  $i$  pour le segment  $j$  par rapport à la propriété  $p$  pour réaliser sa mobilité.

Par exemple, pour un segment sur le trottoir certaines propriétés  $p$  vont être utilisées comme la pente, la largeur de trottoir, la qualité de surface, etc. afin d'évaluer l'accessibilité du segment pour la personne  $j$ .

Pour la zone d'arrêt (le transfert de réseau piétonnier et réseau de transport), certaines propriétés  $p$  vont être utilisées comme : l'Abribus, Planibus, Rampe d'accès, Achalandage, Zone d'Embarquement et débarquement.

Pour la pente de la rampe d'accès, elle dépend directement de la hauteur de Trottoir. En effet, la hauteur du trottoir entre 12 et 27 cm permet d'assurer que la rampe d'accessibilité ait une pente sécuritaire pour les manœuvres des personnes en fauteuil roulant. Le seuil visé pour la pente de la rampe d'accessibilité est d'au maximum 15% (guide de Design des infrastructures, 2018).

#### 4.3 L'approche de la logique floue pour le calcul de l'indice d'accessibilité (Fuzzy logic)

Dans cette méthodologie, le calcul des indices d'accessibilité des différents segments se fait à travers une approche qui permet d'associer les différents niveaux de confiance par rapport aux différents facteurs environnementaux pour mesurer l'accessibilité de déplacement pour chaque utilisateur en fauteuil roulant selon son profil.

La logique floue est introduite par Zadeh et al. (1965) et a été largement utilisée dans de nombreuses applications différentes, notamment la planification des itinéraires et des transports (Kasemsuppakorn & Karimi, 2009) et (Karimanzira et al. 2006)).

En outre, le réseau piétonnier contient des points de décision reliés par des segments de trottoir et de passage pour piétons, où chaque segment est représenté sous la forme d'un vecteur avec des propriétés (Gharebaghi, 2018).

En plus, afin d'intégrer la multimodalité des déplacements il faut prendre en compte l'analyse d'accessibilité des zones d'arrêts comme étant une des composantes nécessaires pour le réseau piétonnier qui pourra par la suite être la liaison entre le réseau piétonnier et les réseaux de transport. Donc, le réseau piétonnier comprend également les zones d'arrêts.

Pour quantifier les niveaux de confiance des individus, comme indiqué précédemment l'échelle de confiance d'utilisation du fauteuil roulant WheelCon, (Rushton et al., 2011) a été utilisée. Selon cette approche, le niveau de confiance de l'utilisateur pour une tâche de mobilité donnée est exprimé par une valeur comprise entre 0 (confiance faible) et 100 (confiance élevée) (Rushton et al., 2011). Ces valeurs ont ensuite été fuzzifiées dans les classes d'ensembles flous par des valeurs d'appartenance prédéfinies (très faible, faible, moyen, élevé et très élevé).

Pour utiliser la logique floue, trois étapes doivent être suivies : (1) construire l'ensemble de règles et définir les fonctions d'appartenance (fuzzification), (2) développer un système d'inférence floue (FIS) en utilisant des règles si-alors et (3) défuzzification des résultats en utilisant un ensemble différent de fonctions d'appartenance pour dériver les variables de sortie (Mamdani & Assilian, 1975).

L'objectif de l'étape de Fuzzification est de transformer les valeurs de confiance numérique en valeurs qualitatives (variables linguistiques) en définissant une fonction d'appartenance. Par exemple, les valeurs des confiances des utilisateurs compris entre 0 et 20 correspondent à un niveau de confiance très faible. Les niveaux Très faible (VL), Faible (L), Moyen (M),

Élevé (H) et Très élevé (VH) sont définies pour décrire les niveaux de confiance. Ensuite, les règles if-then sont définies pour calculer l'indice d'accessibilité pour chaque segment.

En plus, les fonctions d'appartenance pour toutes les variables (A, Pla, RA, ZED, Ach) liés respectivement aux facteurs environnementaux Abribus, Planibus, Rampe d'accès, Zone d'embarquement et débarquement et Achalandage ont été exprimées en valeurs flous. Suite à cela, chaque attribut d'un segment doit être associé à un paramètre niveau de confiance de l'utilisateur (par exemple A\_Con). Dans notre cas, il y avait cinq ensembles flous comprenant (très faible) VL, (faible) L, (moyen) M, (fort) H et (très fort) VH, et cinq variables comprenant A, Pla, RA, ZED et Ach. Les règles If-Then ont ensuite été définies en utilisant les niveaux de confiances par rapport aux attributs pour chaque utilisateur et, par conséquent, calculer le niveau d'accessibilité comme variable de sortie.

Le tableau suivant résume la transformation des valeurs de confiance des utilisateurs à des niveaux de confiance.

Échelle de Confiance	Niveau de confiance
0-20	Très faible (VL)
20-40	Faible (L)
40-60	Moyen (M)
60-80	Fort (H)
80-100	Très Fort (VH)

Tableau 8 : Tableau de transformation des valeurs de confiances en niveaux de confiances

Un exemple de règle définie est comme suit :

Si (le A\_Con est très faible) & (le Ach\_Con est faible) Alors (le niveau d'accessibilité pour ce segment est non accessible).

Le A\_Con et RA\_CON sont les niveaux de confiance de la personne définis par une valeur de confiance dans le profil de l'utilisateur de la personne pour le paramètre Abribus et achalandage respectivement. C'est-à-dire la personne a mis une valeur entre 0 et 20 comme valeur de confiance pour répondre sur la question 13 « Quel est votre niveau de confiance à

attendre le bus dans un arrêt sans abribus? » dans l'interface profil utilisateur ce qui vaut un niveau de confiance très faible et une valeur entre 20 et 40 selon l'échelle pour répondre à la question 18 Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre ou attendre le bus dans une zone d'arrêt achalandée? Ce qui vaut un niveau de confiance faible.

Puis, les valeurs de niveaux d'accessibilité obtenus après avoir identifié toutes les règles et les appliqués sur tous les segments de réseau, cette procédure est appelée la défuzzification comme montré dans le tableau 9.

Critères	Les valeurs possibles	Sources des données
Abribus (A)	(Oui, Non)	RTC
Planibus (Pla)	(Oui, Non)	RTC
Rampe d'accès (RA)	(0 8.33) %	Levée Terrain
Zone d'embarquement et débarquement (ZED)	[0 2.5] m	Levée Terrain/Imagerie Lidar
Achalandage (Ach)	(Oui, Non)	Données ouvertes/enquêtes

Tableau 9 : Tableau résumant les variables utilisées et leurs valeurs possibles

N° règle	Niveau de confiance		Niveau d'accessibilité
	P	Q	
1	VL	VL	NA
2	VL	L	NA
3	VL	M	NA
4	VL	H	NA
5	VL	VH	NA
6	L	L	NA
7	L	M	NA
8	L	H	LA
9	L	VH	LA
10	M	M	LA
11	M	H	MA
12	M	VH	MA
13	H	H	MA
14	H	VH	A
15	VH	VH	VA

Tableau 10 : Tableau résumant les règles du système floues IF-Then

Source : (Gharebaghi, 2018)

Une fois l'indice d'accessibilité est déterminé pour chaque segment du réseau, nous développons l'algorithme de routage qui sera adapté avec l'approche de personnalisation de l'itinéraire selon le profil de l'utilisateur. Cet algorithme de routage comprend à la fois l'approche de personnalisation et multimodalité de déplacement.

#### 4.4 Développement de l'algorithme de routage

L'algorithme de routage est une partie indispensable pour un système de planification de déplacement. Dans cette recherche, nous présentons une méthode pour calculer le temps de trajet minimale, en fonction de profil de l'utilisateur, type de réseau et de l'accessibilité des

arrêts et des parcours de bus. En effet, le temps d'attente dans les arrêts de bus n'est pas pris en considération dans nos calculs d'où le calcul de temps de trajet minimal est mesuré en divisant la distance de chaque segment sur la vitesse moyenne selon l'équation suivante :

$$T_{\text{moy}} = \frac{D}{V_{\text{moy}}}$$

La vitesse moyenne de l'autobus peut différencier d'un lieu à un autre, des heures de pointe aux heures hors-pointe, temps aux arrêts, etc. Par exemple, selon le « Plan de Schéma d'aménagement et de développement de l'agglomération de Montréal »<sup>9</sup>, à Montréal, la Société de Transport de Montréal (STM) calcule la vitesse moyenne des autobus, en tenant compte du temps aux arrêts, les temps d'accélération et de décélération, et les délais dans la circulation est autour de 18 km/h. Cette moyenne inclut des services plus rapides, dans la périphérie et aux heures hors-pointe. Mais pour les heures de pointe, la vitesse moyenne est autour de 10 à 12 km/h aux heures de pointe du matin. Dans notre cas, nous avons choisi la vitesse moyenne des autobus à 15 km/h. En outre, pour la vitesse moyenne des fauteuils roulants sur les trottoirs nous avons choisi 10km/h puisque c'est la vitesse maximale sur le trottoir permise par le ministère de transport pour les personnes en fauteuil roulant<sup>10</sup>.

#### 4.4.1 Trajet en déplacement multimodal

Pour le développement de l'algorithme de routage, nous calculons les couts de façon à avoir un réseau multimodal qui se compose par au moins deux réseaux, le réseau piétonnier et le réseau de transport en commun et les liens qui font la connexion entre les deux réseaux. En effet, pour un tel réseau la notion de hiérarchie est assez importante ce qui implique qu'un réseau peut donner accès à des réseaux de niveau supérieur. Par conséquent, le réseau multimodal implique des réseaux de déplacement à plusieurs niveaux. Un réseau de déplacement hiérarchique dans ce contexte est un réseau dans lequel des niveaux de réseau fonctionnellement différents peuvent être distingués. Chaque niveau de réseau convient à des types de déplacements particuliers, surtout en ce qui concerne la durée des déplacements. Les

---

<sup>9</sup>[http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/COMMISSIONS\\_PERM\\_V2\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/MEM\\_FRAYNE-ANTHONY\\_20141112.PDF](http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/COMMISSIONS_PERM_V2_FR/MEDIA/DOCUMENTS/MEM_FRAYNE-ANTHONY_20141112.PDF)

<sup>10</sup> <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/securite-signalisation/regles-circulation/regles-specifiques-amm/Pages/regles-specifiques-amm.aspx#:~:text=La%20vitesse%20de%20l'AMM,ou%20encore%20sur%20l'accotement.>

réseaux de déplacement de niveau supérieur sont adaptés aux déplacements sur de longues distances et des vitesses élevées. Les réseaux de niveau inférieur sont conçus pour les déplacements sur de courtes distances et des vitesses faibles (Nes, 2002). Pour cela, nous associons les valeurs des attributs pour chaque niveau associé à chaque type dans le réseau de déplacement en commençant par 1 pour le réseau de transport en commun puisqu'il propose les vitesses les plus élevées et l'attribut et niveau 2 pour les transferts et l'attribut et niveau 3 pour le réseau de trottoirs puisque la vitesse moyenne dans ce réseau est le plus faible. En effet, l'objectif est de minimiser l'impédance pour les types de segments à prioriser c'est ce qui explique que dans le réseau hiérarchique la route passe d'un niveau inférieur à un niveau supérieur. Par exemple dans un réseau des routes de type national, régional, secondaire nous assignons un attribut 1 au niveau 1 qui convient à la route nationale et attribut 2 qui convient à la route régionale et attribut 3 qui convient à la route secondaire<sup>11</sup>. Ensuite, nous multiplions ces poids par le temps moyen calculé pour chaque segment des deux réseaux de transport et piétonnier. Le tableau suivant nous montre les poids prioritaires pour chaque segment de réseau et la fonction de calcul de cout.

Type de segment	Attributs	Fonction
Trottoir	3	$3*(D/10)$
Transfert	2	2
Transport	1	$1*(D/15)$

Tableau 11: Fonctions attribuées aux divers segments de réseau de déplacement

#### 4.4.2 Personnalisation de l'itinéraire en fonction de profil de l'utilisateur

Un itinéraire accessible selon le profil de l'utilisateur est un de nos objectifs dans ce projet et nous avons présenté cette approche dans ce chapitre. En effet, intégrer la méthode de logique floue dans l'algorithme de routage est nécessaire pour le calcul de l'accessibilité des segments de réseau de déplacement et plus précisément le réseau de trottoir incluant les zones d'arrêts. Pour ce faire, nous commençons l'agrégation des valeurs de confiance pour chaque

<sup>11</sup> [http://downloads.esri.com/support/whitepapers/other\\_/ArcGIS\\_NA\\_Hierarchical\\_Routes\\_Aug05.pdf](http://downloads.esri.com/support/whitepapers/other_/ArcGIS_NA_Hierarchical_Routes_Aug05.pdf)

paramètre sur chaque segment. Ensuite, nous appliquons les règles du système floues pour produire un indice d'accessibilité pour chaque segment (Voir paragraphe 3.3). Finalement, les valeurs des couts pour chaque segment ayant un indice d'accessibilité « non accessible » seront multipliées par une valeur négative (-1) pour but d'interdire le passage sur ce segment pour l'utilisateur, car il s'agit d'un segment inaccessible selon son profil. En effet, en appliquant l'algorithme Dijkstra dans pgRouting, les segments ayant des coûts négatifs seront considérés comme impassibles (pas de chemin).<sup>12</sup>

Dans le tableau suivant, nous présentons des exemples de fonctionnement de l'algorithme selon le niveau de l'accessibilité pour un trajet dans le réseau piétonnier commençant par O passant par les points A, B, C situés sur le réseau de trottoir et arrivant à une zone d'arrêt de bus D. En effet, les segments de ce trajet vont être, O-A, A-B, B-C et C-D(transfert).

Segment	Niveau d'accessibilité	Cout
O-A	Non Accessible (NA)	$(-1)*3*(D/V)$
A-B	Très Accessible (TA)	$3*(D/V)$
B-C	Accessible (A)	$3*(D/V)$
C-D (arc de transfert)	Moyennement Accessible (MA)	2

Tableau 12: Comportement de l'algorithme en fonction des niveaux d'accessibilité et type de segment de réseau de déplacement

Dans le but de développer l'algorithme de routage, nous devons calculer le cout pour chaque segment de réseau en intégrant les différentes valeurs de couts, ceci doit être intégré dans l'extension pgRouting<sup>13</sup> dédiée pour l'implémentation de l'algorithme de routage dans la base de données.

#### 4.4.3 Intégration des valeurs des couts avec l'algorithme pgRouting

L'objectif principal de ce travail est de développer un algorithme de recherche d'itinéraire multimodal accessible en utilisant l'algorithme pgRouting et les couts calculés. En utilisant

<sup>12</sup> <https://docs.pgrouting.org/2.0/fr/src/kdijkstra/doc/index.html>

<sup>13</sup> <https://docs.pgrouting.org/2.0/fr/doc/index.html>

les algorithmes pgRouting et Dijkstra, le déplacement multimodal accessible nous permet de déterminer les meilleurs itinéraires appropriés dans les conditions et critères prédéfinis et à travers le réseau de graphe présent.

Le pgRouting est une bibliothèque de langage C qui supporte les algorithmes les plus courts chemins comme Dijkstra, a-star et shooting-star. Il s'agit d'une extension de la base de données géospatiales PostGIS/PostgreSQL pour fournir des fonctionnalités de routage géospatial. L'algorithme pgRouting classique, tel qu'une fonction de Dijkstra, sélectionne un résultat d'itinéraire basé sur le coût minimum (distance, temps ...) du réseau de déplacement (Kastl et Junod, 2010).

L'algorithme pgRouting représente un outil puissant pour aider à trouver le chemin optimal selon des critères bien déterminés. Afin de trouver l'itinéraire optimal entre deux points donnés, il faut sélectionner soit le chemin le plus court entre eux, soit l'itinéraire ayant un temps de parcours minimum (Yang et Li, 2010).

L'algorithme Dijkstra en pgRouting est l'un des algorithmes permettant de minimiser les coûts du point de départ au point d'arrivée (par exemple il propose la distance la plus courte sur le réseau routier). Il est basé sur un graphe qui contient un ensemble de nœuds  $V$  et un ensemble d'arêtes  $E$  (une arête désigne ici un segment de route dans le réseau réel), défini par paire de nœuds. Chaque arête  $E(i, j)$  a un poids (ou coût)  $W(i, j)$ , qui dans sa forme de base représente la distance entre les deux nœuds du segment de route. Une valeur est attribuée à chaque arête, qui est la somme des coûts du nœud de départ au nœud lui-même. Étant donné un réseau avec un coût connu, le problème du chemin optimal consiste à trouver le coût le plus faible entre un nœud source  $A$  et un nœud spécifique dans l'ensemble de nœuds  $V$ .

Le réseau de transport en commun est défini par des sens de directions comme par exemple pour le réseau de bus il y a deux sens, un sens pour aller et un autre sens de retour. Le sens de directions des parcours de bus dans le réseau de transport est parmi les éléments essentiels à intégrer dans pgRouting<sup>14</sup>. Pour ce faire, les variables de coûts et coûts inverses vont être modifiées de façon à avoir des lignes à un sens unique selon la direction souhaitée.

L'algorithme à implémenter est le suivant :

**SI** (cout>0 **et** cout-inverse>0) **Alors** 'deux sens'

---

<sup>14</sup> <https://docs.pgrouting.org/2.0/fr/doc/src/developer/sampleddata.html#sampledata>

**SI** (cout>0 **et** cout-inverse<0) **Alors** 'sens de ligne (Linestring)'

**SI** (cout<0 **et** cout-inverse>0) **Alors** 'sens inverse de ligne'

Dans un SIG, une LineString (ou une chaîne de ligne) peut être représentée en utilisant le format Well-known text(wkt) bien connue pour les objets géométriques (Ryden & Specification, 2005). La figure suivante nous montre la représentation d'une chaîne de ligne.

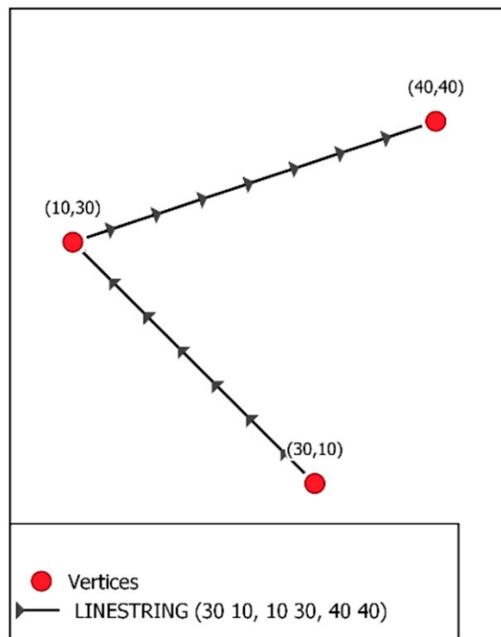


Figure 11 : Format Well-known Text et représentation géométrique d'une Linestring

Le Linestring (30 10, 10 30, 40 40) a trois sommets qui sont représentés par les coordonnées (30,10), (10,30) et (40,40). Le premier sommet est situé aux coordonnées (30,10) et le dernier sommet aux coordonnées (40,40). Le sens de ces chaînes de ligne est représenté par des vecteurs ou par l'ordre des sommets.

Finalement, les étapes de développement de l'algorithme de routage multimodal accessible selon le profil de l'utilisateur sont présentées dans un digramme de flux dans la figure suivante :

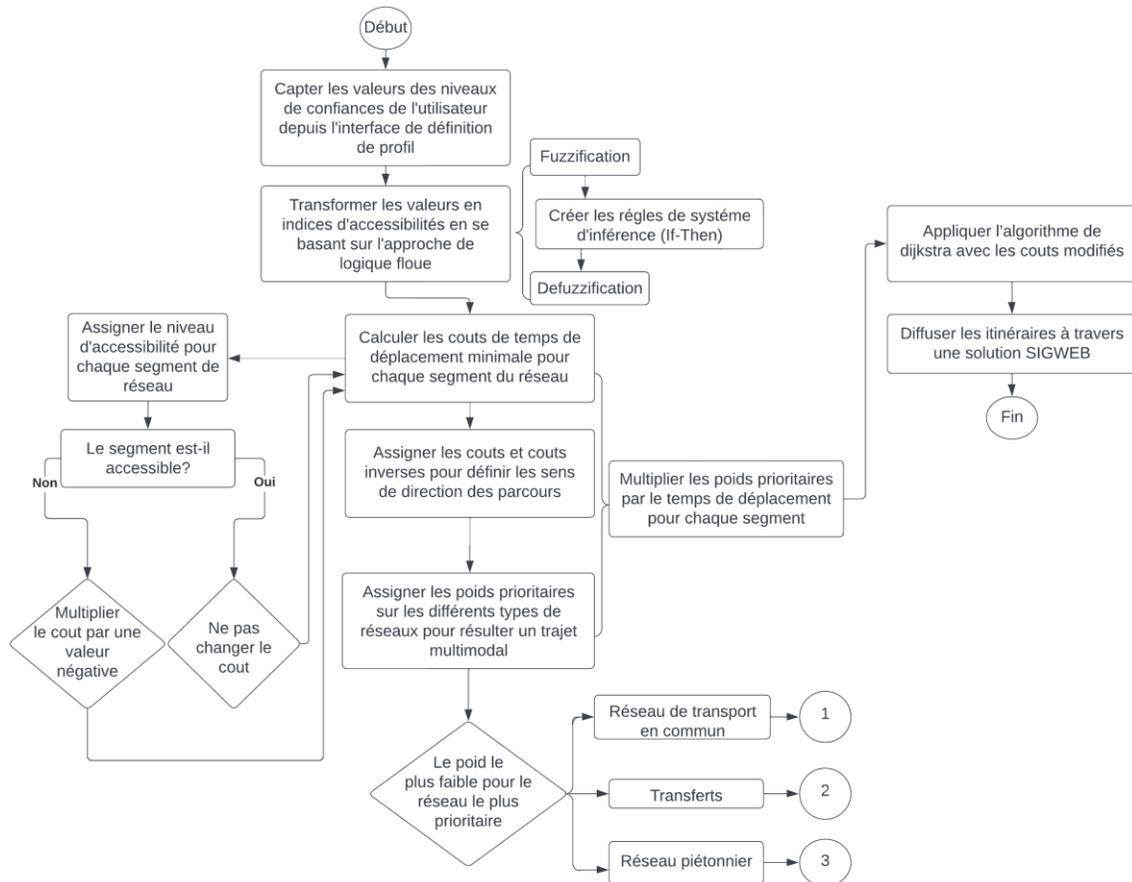


Figure 12 : Diagramme de Flux de la méthodologie de développement de l'algorithme de routage

#### 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche basée sur la personnalisation des itinéraires de déplacement multimodal selon le profil pour les utilisateurs de fauteuil roulant. En premier lieu, nous avons proposé une méthode de calcul de l'accessibilité de déplacement en tenant compte de la confiance de l'utilisateur par rapport aux propriétés liées aux facteurs environnementaux définies dans des questionnaires dans le profil de l'utilisateur. En second lieu, nous avons proposé l'algorithme de routage qui est capable d'offrir à la fois la personnalisation des itinéraires et le déplacement multimodal. Pour ce faire, nous avons développé l'algorithme sur la base de l'algorithme Dijkstra modifié en combinaison avec l'algorithme pgRouting. Ainsi, après avoir expliqué la méthodologie conceptuellement, nous allons commencer dans le chapitre suivant l'implémentation de notre système.

## Chapitre 5 : Implémentations et résultats

Dans les chapitres 3 et 4, nous avons présenté la méthode proposée pour notre système de routage multimodal personnalisé selon le profil d'utilisateur. Ce chapitre porte sur le développement et l'implémentation de la méthode proposée suivant l'architecture établie. Tout d'abord, nous expliquerons l'architecture de notre système et les choix technologiques. Ensuite, nous décrivons la préparation des données et la conception de la base de données. Finalement, nous présenterons quelques scénarios de planification de route multimodale accessible avec les données de la ville de Québec comme cas d'étude pour des fins de validation de la méthode proposée.

### 5.1 Architecture du système proposé

Dans ce projet, nous visons une application SIGWEB comme interface de planification d'un déplacement multimodal pour les personnes en fauteuil roulant. Le SIGWEB est la combinaison des SIG et la technologie internet, permettant la création, la publication, l'interrogation, le partage et l'analyse de données géospatiales via internet. Il est possible de définir la cartographie en ligne ou « Webmapping » comme un « processus de transfert de données géoréférencées via un réseau tel qu'Internet ou un intranet sur des applications cartographiques via une interface web » (Mitchell, 2005).

L'architecture d'un SIGWEB est basée généralement sur le modèle 3-tier et est formée de trois composantes : Client, Serveur cartographique, Serveur de données (Laury et Saysanasy, 2012). L'architecture 3-tier est un modèle logique d'architecture applicative qui vise à séparer trois couches logicielles au sein d'une même application ou système. Le choix d'une telle architecture vise à simplifier la maintenance et améliorer la sécurité de l'application. Elle sert également à modéliser et présenter cette application en trois couches, la couche d'interface, la couche d'application et la couche de base de données.

- Le client accède au système par la couche d'interface qui prend l'entrée et affiche ensuite la sortie sur le système.

- La couche d'application (Serveur cartographique), affiche les fonctions de visualisation des données (satellite, topographique, autres...), le zoom et d'autres fonctions comme la sélection, l'édition et la requête, etc.
- La couche de serveurs de données gère les données et la façon dont elles sont présentées et distribuées.

La figure 13 montre l'architecture d'un système 3 tiers dont les 3 modules décrits précédemment s'interagissent pour la mise en place d'un SIGWEB.

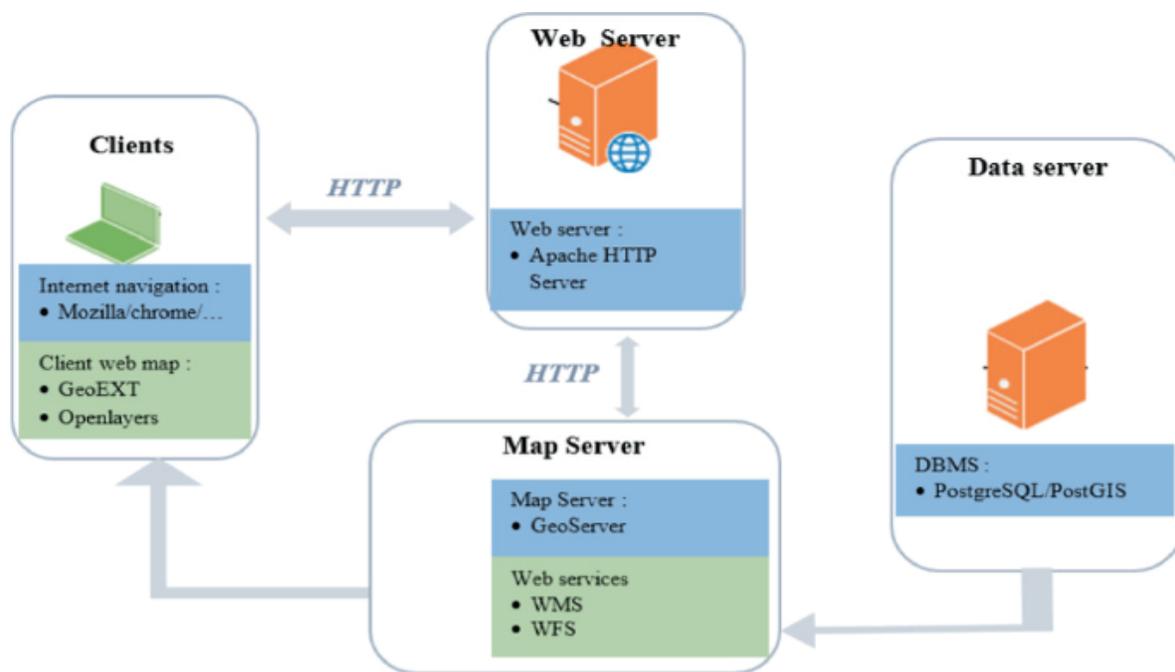


Figure 13 : Architecture 3 tiers pour un système SIGWEB

Source : (Nasirzadehdizaji, 2017)

D'un point de vue fonctionnel, le client, à travers un navigateur quelconque et par le protocole HTTP envoie une requête au serveur web (Apache dans notre cas). Cette requête est encapsulée dans l'API Open Layers ou Leaflet. Le serveur Web envoie une requête SQL au serveur de données (PostGIS dans notre cas). PostGIS renvoie des fichiers SIG ou textes (GeoJson) au serveur cartographique (GeoServer). Enfin, Geoserver renvoie les entités

géographiques aux formats WMS ou WFS au client. Donc, La carte s'affiche sur le navigateur d'utilisateur.

L'architecture du système est illustrée par la figure 14 :

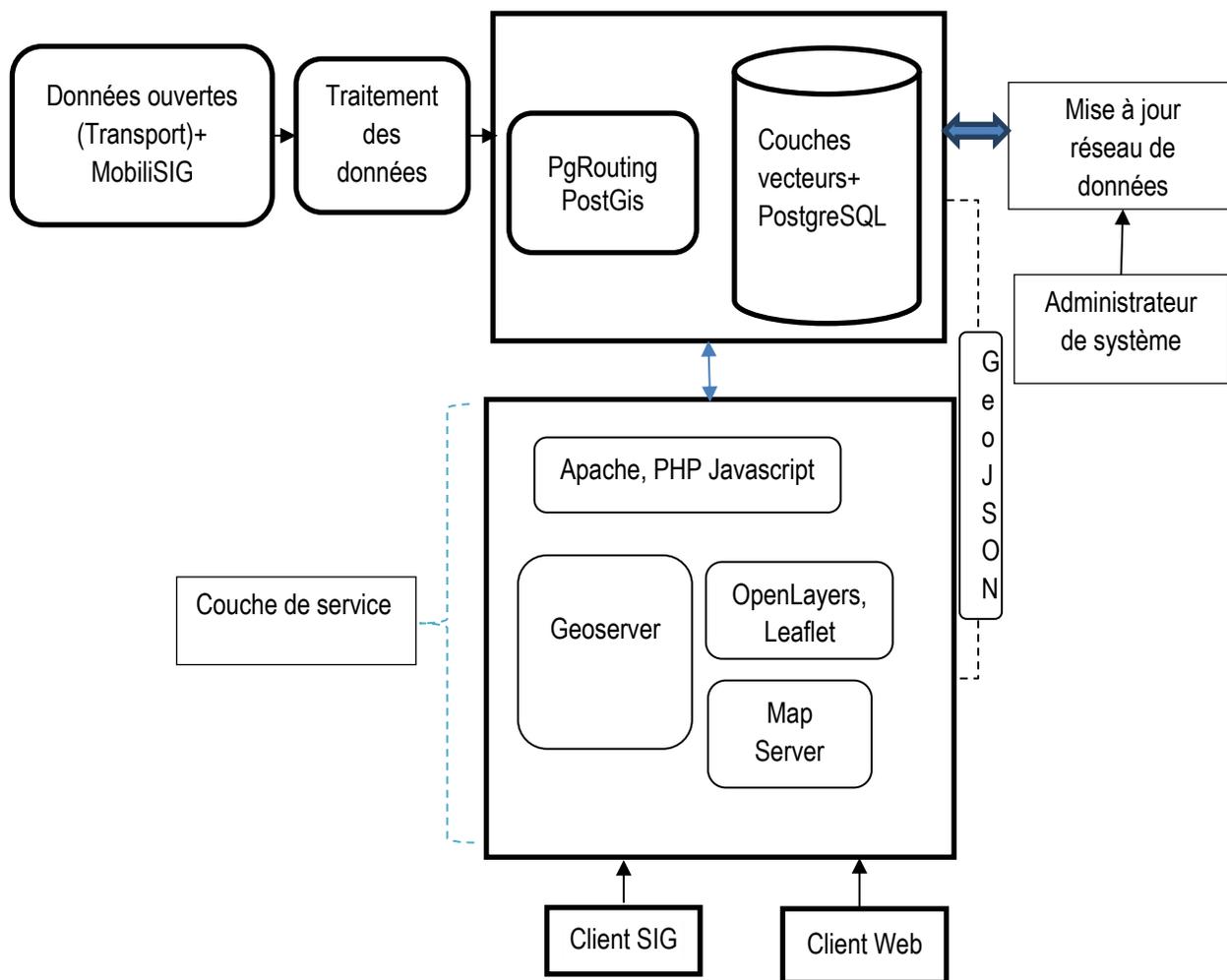


Figure 14 : Architecture de système

## 5.2 Préparation des données et conception de réseau multimodal

Le réseau multimodal dans notre zone d'étude (la ville de Québec) se compose de réseau piétonnier et réseau de transport. La combinaison de ces réseaux en un seul réseau crée le réseau multimodal qui est en effet le transfert d'un mode de déplacement à un autre mode ou plus.

Les données sources des réseaux constituant le réseau multimodal sont à la base, le réseau piétonnier issu des données ouvertes de la ville de Québec et d'autres sources comme les données ouvertes de réseau de transport en commun, le réseau préparé par les autres équipes de projet MobiliSIG, etc... Le diagramme dans la figure 15 illustre le processus de préparation des données pour la construction du réseau multimodal :

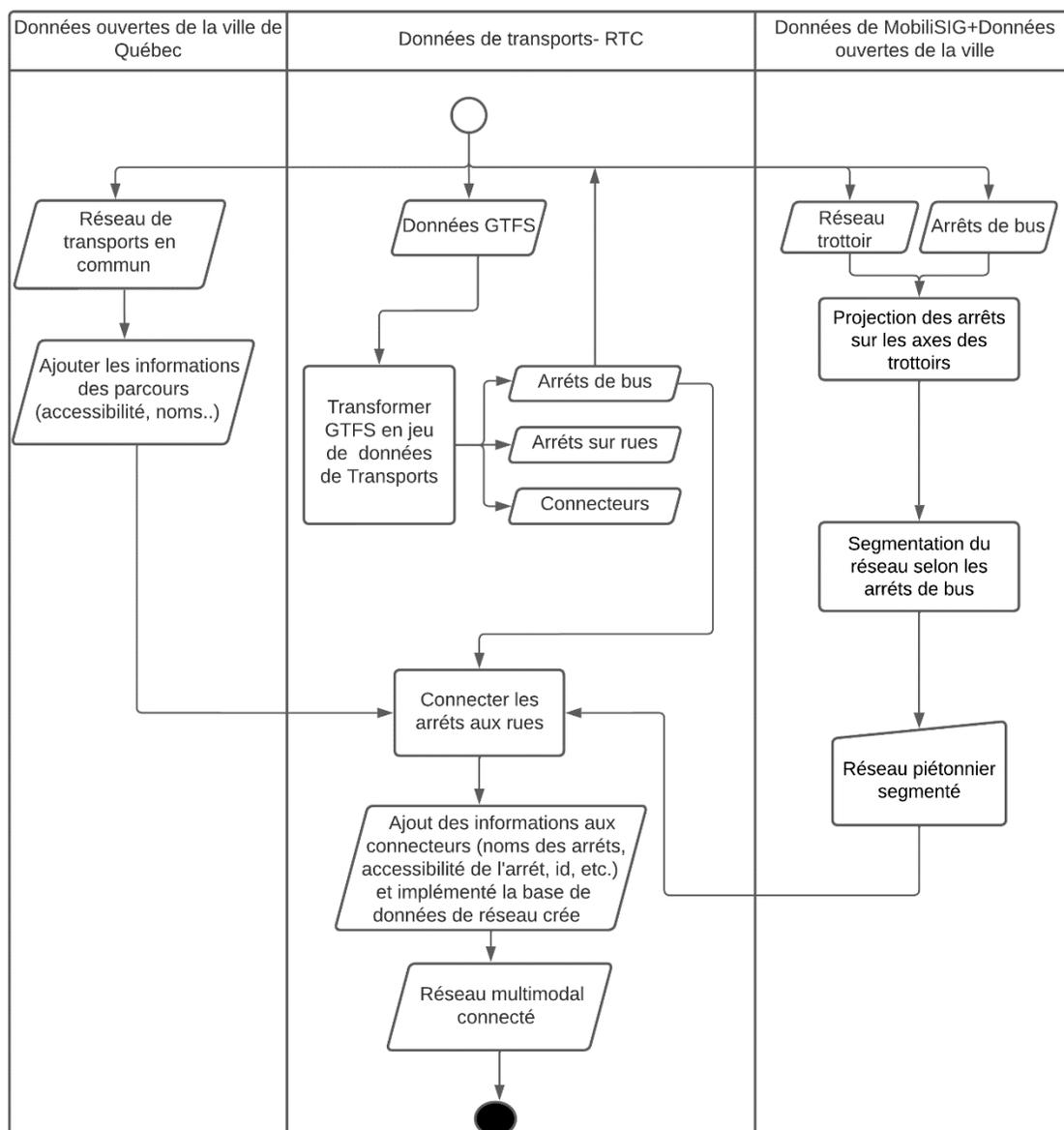
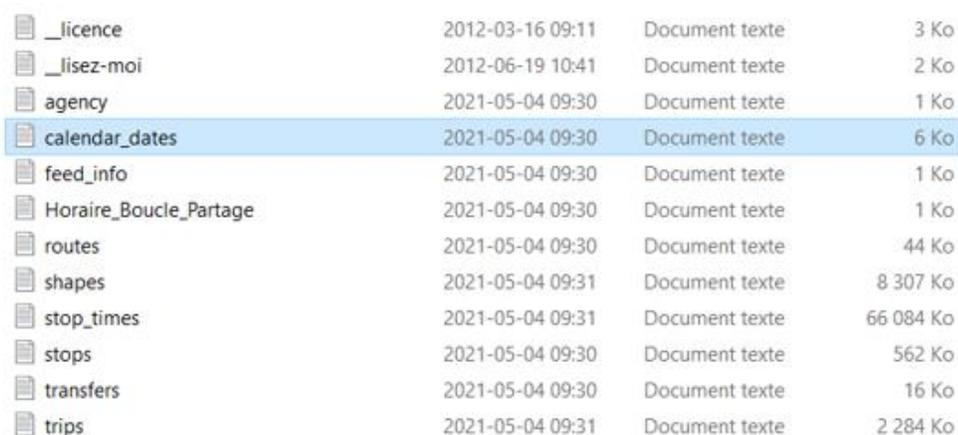


Figure 15 : Diagramme de processus de préparation de réseau multimodal

Pour créer le réseau multimodal, nous avons passé par les étapes suivantes :

- 1) Transformer les données GTFS en des couches d'entités et tables attributaires avec l'outil GTFS vers entités en ArcGIS pro. Ces données vont être utilisées par la suite comme des données de transport pour la conception de notre réseau.

Général Transit Feed Specification (GTFS) est un format informatique standardisé pour communiquer des horaires de transports en commun et les informations géographiques associées contenant les informations telles que sur les arrêts, les transferts, les horaires, les géométries des routes de transports, etc. Un exemple des contenus des données GTFS est illustré dans la figure 16.



_licence	2012-03-16 09:11	Document texte	3 Ko
_lisez-moi	2012-06-19 10:41	Document texte	2 Ko
agency	2021-05-04 09:30	Document texte	1 Ko
calendar_dates	2021-05-04 09:30	Document texte	6 Ko
feed_info	2021-05-04 09:30	Document texte	1 Ko
Horaire_Boucle_Partage	2021-05-04 09:30	Document texte	1 Ko
routes	2021-05-04 09:30	Document texte	44 Ko
shapes	2021-05-04 09:31	Document texte	8 307 Ko
stop_times	2021-05-04 09:31	Document texte	66 084 Ko
stops	2021-05-04 09:30	Document texte	562 Ko
transfers	2021-05-04 09:30	Document texte	16 Ko
trips	2021-05-04 09:31	Document texte	2 284 Ko

Figure 16 : Données GTFS

- 2) Avec l'outil « connecter les sources de transport aux rues » on crée les arrêts sur axes de rues et les connexions entre les arrêts sur le trottoir (stops) et les arrêts créés sur les rues (StopsOnStreet) qui sont les projections des arrêts de trottoir sur les axes des rues.

La figure 16 illustre un extrait du réseau multimodal composé par le réseau piétonnier (en vert), les connecteurs (ou Transfer) (en bleu) et le réseau de Transport (en violet).

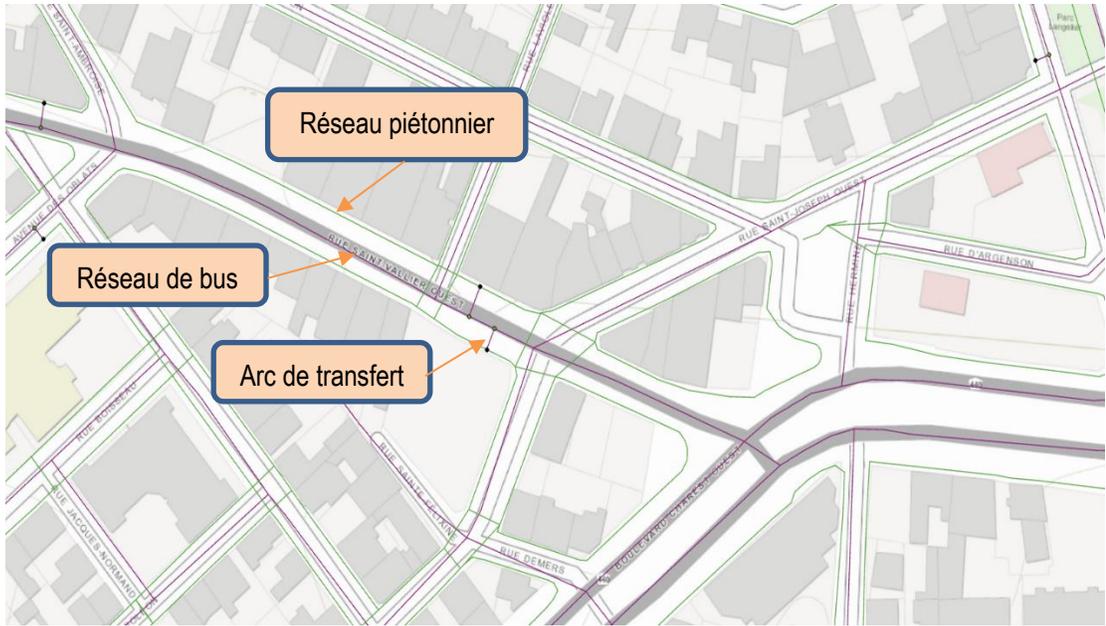


Figure 17 : Réseau multimodal résultant

- 3) Analyse de réseau de transport et intégration des informations d'accessibilité des parcours ainsi que sur les arrêts de bus en implémentant la base de données avec toutes les informations d'accessibilité, des propriétés des facteurs environnementaux comme les données sur les pentes, la qualité des surfaces des trottoirs ainsi que les noms des rues, numéros des bus et id des arrêts des bus. Dans la base de données on a toutes les informations sur les arrêts accessibles et les parcours accessibles ainsi que les autres informations telles que la présence des abribus, planibus, les arrêts achalandés, etc.

Les figures 18 et 19 nous montrent un exemple de la base de données :

FID	Shape *	TARGET FID	OBJECTID	gid_oid	id	type	source_don	nom_topogr
6656	Polyline	63972	63973	63340	48411	Trottoir	vdq	Avenue des Sciences-Humaines

Figure 18 : Exemple de table attributaire pour un segment de trottoir

ARRET	ABRIBUS	AFFICHES	stop_id	stop_name	stop_desc	stop_lat	stop_lon
1561	AB97602	AF1561-1; AF1561-2; AF1561-3; AF1561-4	1561	Université Laval	de l'Université / des S.-Humaine	46.779384	-71.27012

Figure 19 : Exemple de table attributaire d'un segment de type transfert dans la base de données

La conception de réseau multimodal était une étape nécessaire pour la conception de notre système. En effet, le réseau multimodal est créé à partir de plusieurs sources de données tels que le réseau piétonnier de MobiliSIG, le réseau de transport issu des données ouvertes de la ville de Québec et les données de transports telles que GTFS qui nous permettent d'intégrer les noms des arrêts, les informations sur l'accessibilité, etc. Le réseau piétonnier est préparé par les équipes de MobiliSIG qui ont travaillé sur le réseau allant particulièrement de la zone du campus de L'université Laval à la zone de Saint-Roch et ils ont inclus également des propriétés physiques et sociales dans la base de données comme les obstacles et facilitateurs en milieu urbain (Gharebaghi, 2018).

Afin de tester les connectivités de réseau multimodal, la planification de quelques trajets dans la zone d'étude était essentielle pour confirmer la topologie du réseau et les connectivités entre le réseau piétonnier et le réseau de transport à travers les connecteurs. Ainsi, pour vérifier si notre réseau peut offrir la possibilité de se déplacer d'un réseau piétonnier à un réseau de transport en commun. Alors, pour illustrer un déplacement d'un point A à B, nous avons utilisé, en premier temps, les outils offerts par ArcGIS dans « Network Analyst » notamment l'outil du plus court chemin. Cet outil nous permet d'avoir le chemin le plus optimal selon le cout de déplacement en sens direct « cost » et le cout de déplacement en sens inverse « reverse\_cost » établie dans les paramètres de l'outil après avoir créé les jeux de données réseaux. Un exemple de fonctionnement de cet outil est illustré dans la figure 20 :

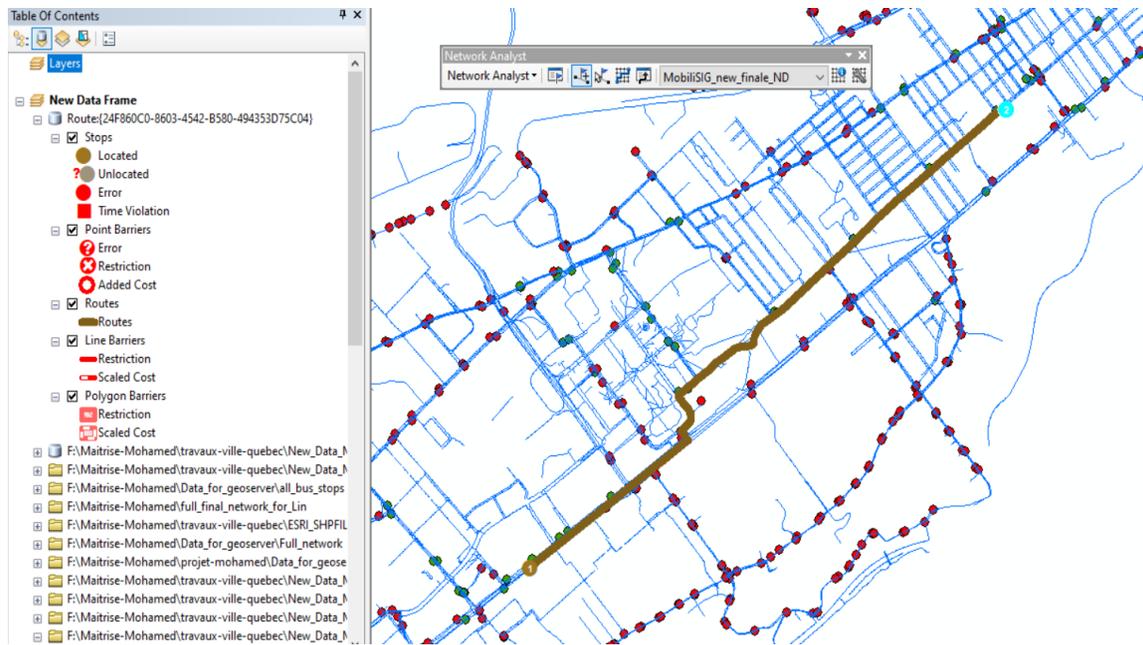


Figure 20 : Résultat plus court chemin de l’outil Network Analyst (ArcGIS)

### 5.3 Importation des données dans la base de données de MOBILISIG

La première étape serait de réserver un espace de travail pour la nouvelle version de MOBILISIG de déplacement multimodal dans le système de gestion de la base de données qui sera la source des données dans le serveur de notre système. Ensuite, après avoir ajouté l’extension des requêtes spatiales PostGIS, nous devons ajouter l’extension de routage pgRouting qui est nécessaire pour l’implémentation de l’algorithme de routage dans la base de données.

La démarche est la suivante :

```
# Créer une base de données :
# CRÉER LE NOM DE BASE DE DONNÉES :
```

```
CREATE DATABASE msig_8 ;
```

```
# Ajouter l’extension Postgis
```

```
CREATE EXTENSION Postgis ;
```

```
# Ajouter l'extension pgRouting
```

```
CREATE EXTENSION pgRouting;
```

Puis, on importe nos données et la base de données avec l'outil open source PostGIS Shapefile Import/Export Manager.

#### 5.4 Création de la Topologie de réseau de graphe dans pgRouting

La création de réseau de graphe est une étape nécessaire pour l'implémentation de l'algorithme de routage. Pour créer la topologie de réseau de graphe dans pgRouting, il faut préparer les données nécessaires pour la fonction de création de topologie qui sont la table des données de réseau qui est appelée « test\_full\_network\_msig » dans notre cas, la source de chaque segment, la destination de chaque segment (target), id de chaque nœud de réseau, la géométrie des lignes de réseau (Geom).

```
-- creation de la colonne source
```

```
ALTER TABLE test_full_network_msig ADD COLUMN source integer;
```

```
-- creation de la colonne target
```

```
ALTER TABLE test_full_network_msig ADD COLUMN target integer;
```

```
--- creation du reseau topologique
```

```
SELECT pgr_createTopology ('test_full_network_msig',0.001,'the_geom','id','source',  
'target');
```

#### 5.5 Génération des sens de direction des parcours de Bus

Le réseau de données est stocké sous forme des nœuds et arcs selon la théorie des réseaux de graphes (Bretto et al., 2012). Les arcs sont attribués d'un poids qui peut être défini par cost (coût) et reverse cost (coût inverse) pour les réseaux bidirectionnels.

On utilise les champs coût et coût inverse pour définir les sens de directions des trajets de bus. En effet, si le coût est positif et le coût inverse est positif, le segment peut être accessible

par les deux sens de direction. En outre, si le coût est positif et coût inverse est négatif alors le sens de direction est celui du sens cartographique de la ligne (défini par Source, Target dans l'algorithme pgRouting) (voir figure 17) et vice-versa c'est-à-dire si le coût est négatif et le coût inverse est positif alors le sens de direction est le contraire du sens cartographique comme établie dans la requête SQL prise de site web de manuel de pgRouting suivante :

```
dir = CASE WHEN (cost>0 AND reverse_cost>0) THEN 'B' -- both ways
          WHEN (cost>0 AND reverse_cost<0) THEN 'FT' -- direction de la LINESTRING
          WHEN (cost<0 AND reverse_cost>0) THEN 'TF' -- direction inverse de la LINESTRING
          ELSE '' END;
```

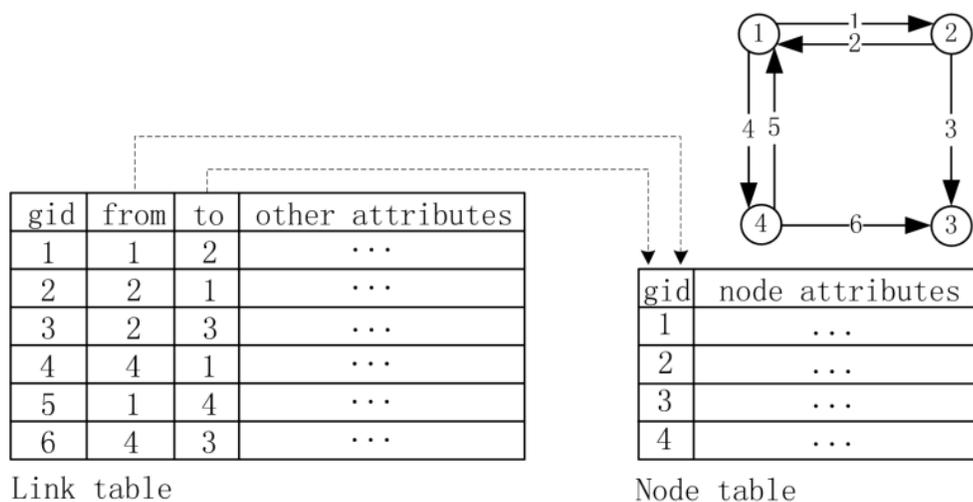


Figure 21 : Modèle de données nœud-arc bidirectionnel dans les bases de données relationnelles

Par exemple dans cette figure, les liens entre les nœuds 1 et 2 restent représentés de manière bidirectionnelle (particulièrement important pour la conception du transport en commun et les études basées sur les routes). Les liens entre les nœuds 4 et 3 sont représentés de manière unidirectionnelle, ce qui signifie que la rue bidirectionnelle est représentée comme une seule entité géométrique dans la carte SIG. Nous profitons des directions cartographiques numériques de ces liens et ajoutons une colonne supplémentaire "direction" qui représente la relation entre les objets stockés.

## 5.6 Implémentation de l'algorithme de routage avec des requêtes SQL en pgRouting

L'algorithme de routage est implémenté principalement dans la base de données après avoir ajouté l'extension de routage pgRouting. Cette partie est faite à travers des requêtes SQL implémentées dans PostgreSQL/PostGIS et pgRouting dont l'algorithme de Dijkstra modifiée est intégré.

Tout d'abord, nous commençons par intégrer les questions de profil utilisateur et les paramètres associés dans la base de données. Par exemple, pour la question 13 « Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans abribus ? », nous appliquons notre fonction de calcul d'accessibilité selon le profil de la personne. En effet, nous créons une fonction pour calculer le niveau d'accessibilité de chaque segment pour l'utilisateur, s'il s'agit d'un niveau de confiance faible ou très faible, le coût (cost) et cout inverse (reverse cost) seront remis à une valeur négative pour ce même segment. Ensuite, l'algorithme va prendre les valeurs des coûts (cost) et coûts inverse (reverse cost) de tous les segments depuis les colonnes de cost et reverse cost dans la base de données et il va faire les mises à jour selon l'accessibilité de l'itinéraire pour le profil d'utilisateur défini dans l'interface de profil pour éviter les itinéraires qui ne sont pas accessibles, c'est-à-dire ayant un niveau d'accessibilité très faible ou faible. Dans la figure suivante, nous présentons la fonction implémentée pour transformer les confiances en niveaux d'accessibilité.

```
BEGIN

    IF ( valeur >= 0 ) AND ( valeur <= 20 ) THEN texte := 'VL'; END IF;
    IF ( valeur > 20 ) AND ( valeur <= 40 ) THEN texte := 'L'; END IF;
    IF ( valeur > 40 ) AND ( valeur <= 60 ) THEN texte := 'M'; END IF;
    IF ( valeur > 60 ) AND ( valeur <= 80 ) THEN texte := 'H'; END IF;
    IF ( valeur > 80 ) AND ( valeur <= 100 ) THEN texte := 'VH'; END IF;

RETURN;
END;
```

Figure 22: Fonction de transformation des valeurs de confiance en niveaux d'accessibilité

Finalement, nous appliquons l'algorithme Dijkstra en utilisant les valeurs des coûts (cost) et coûts inverses (reverse cost) qui seront modifiés en se basant sur l'accessibilité de l'itinéraire selon le profil de l'utilisateur.

## 5.7 Résultats et Tests

Pour tester et valider notre système de diffusion, nous avons défini quelques scénarios qui sollicitent les différents besoins et fonctionnalités de notre système de planification en déplacement multimodal, ce qui va nous permettre de vérifier si le système répond effectivement à nos objectifs. Le premier scénario est un cas de planification qui commence par un trajet simple sans transit c'est-à-dire sans besoin à changer le parcours de bus à un autre parcours, le deuxième scénario est un cas de planification plus avancée qui présente un trajet multimodal avec des changements de parcours de bus. Dans ce scénario, on va discuter la différence entre notre trajet et le trajet proposé par Google Maps. D'une façon générale, ces scénarios nous présentent des scénarios démonstratifs pour nous montrer à quel point nous avons réussi à atteindre nos objectifs.

### 5.7.1 Interfaces de notre application web

Dans notre application, nous présentons deux interfaces, une pour définir le profil utilisateur et l'autre pour la planification de trajet.

Nous commençons par montrer l'interface de profil utilisateur qui contient toutes les questions que l'utilisateur doit remplir dans la figure 23.

10. Quel est votre niveau de confiance à traverser une rue, où la circulation est faible, à une traverse piétonnière dépourvue de feux de circulation? 5.0 ?

11. Quel est votre niveau de confiance à manœuvrer votre fauteuil roulant manuel afin d'appuyer sur le bouton d'appel de feux pour piétons et traverser la rue avant que les feux ne changent? 50.0 ?

12. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel dans une foule sans heurter quelqu'un? 25.0 ?

13. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans abribus? 30.0 ?

14. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans Planibus? 40.0 ?

15. Quel est votre niveau de confiance à monter et descendre de bus à travers la rampe d'accès de pente moyenne ou forte? 20.0 ?

16. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans la zone d'embarquement et de débarquement de longueur libre de moins de 2.4m et de largeur de moins 1.5m? 35.0 ?

17. Quel est votre niveau de confiance à monter une pente plus de 1 :20 (5%) et bateau pavé de plus de 1 :10 (10%)? 50.0 ?

18. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans une zone d'arrêt achalandées? 0.0 ?

Figure 23 : Interface du profil utilisateur

La deuxième interface de planification est illustrée dans la figure 24.

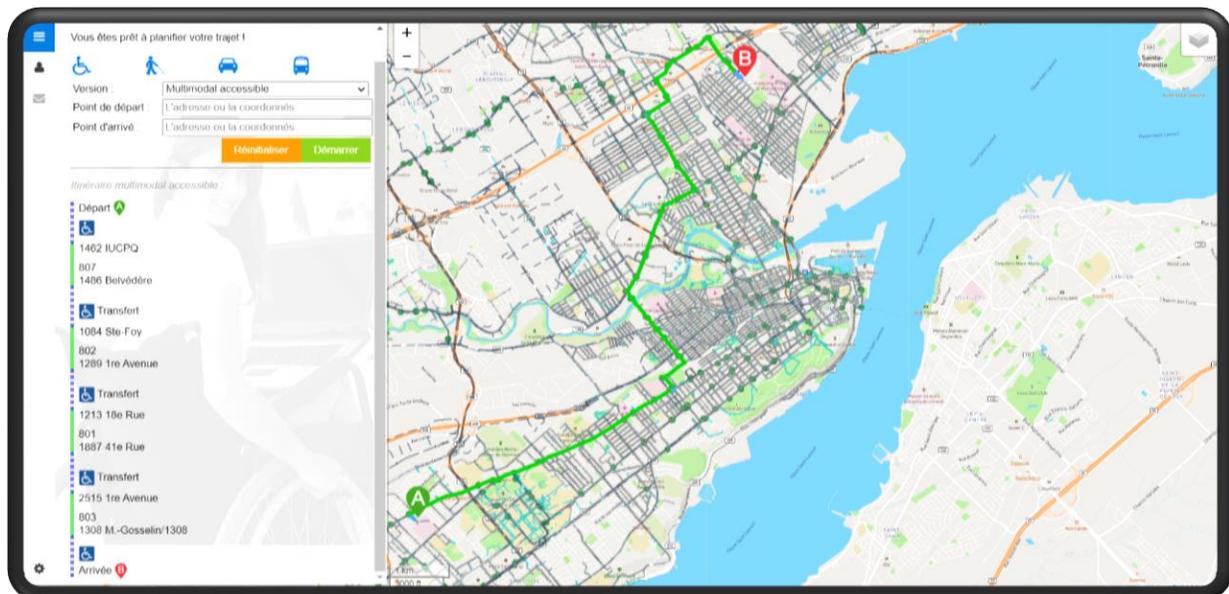


Figure 24 : Interface de planification d'un trajet multimodal

## 5.7.2 Cas d'étude dans la ville de Québec

Pour mettre en valeur les résultats obtenus, nous avons mis en place des scénarios démonstratifs dans un cadre de cas d'étude dans la ville de Québec.

### Scénario 1 :

Une personne a un niveau de confiance faible envers les arrêts achalandés et les pentes >5%, veut aller de l'université Laval vers rue des parlementaires au niveau de l'édifice Honoré-Mercier. Il commence par remplir l'interface de profil en répondant aux questions présentées avec des valeurs entre 0 et 100 (de plus faible vers très élevé) selon son niveau de confiance. Les questions 1 et 18 liées aux paramètres pente et achalandage seront illustrées dans les figures 25 et 26.

Profil

mobiliSIG

CRÉER UN PROFIL

PROFIL UTILISATEUR

PARAMÈTRES

Complétez votre profil Planification

CODE D'IDENTIFICATION: 1 NOM: Mathew Tremblay ÂGE: 25

GENRE: 1 ÉTAT CIVIL: — PLUS HAUT NIVEAU DE SCOLARITÉ ATTEINT: —

DIAGNOSTIC: Paraplegic TYPE DE FAUTEUIL ROULANT: Quickie II Manual

Évaluez votre niveau de confiance entre 0 à 100% (WheelCon)

1. Quel est votre niveau de confiance à monter avec votre fauteuil roulant manuel une **pente** abrupte lorsque la surface est sèche (inclinaison > à 5°)? 0.0 ?
2. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur un trottoir **pavé, crevassé et inégal**? 0.0 ?
3. Quel est votre niveau de confiance à vous déplacer avec votre fauteuil roulant manuel sur un trottoir couvert de 5 cm (2 pouces) de **neige**? 30.0 ?
4. Quel est votre niveau de confiance à franchir avec votre fauteuil roulant manuel un **trou** plus large que votre fauteuil roulant manuel et de 5 cm (2 pouces) de profondeur? 70.0 ?

Figure 25 : Question 1 dans Profil utilisateur

Question	Confiance (0.0 - 100.0)	?
13. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans abribus?	30.0	?
14. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans Planibus?	40.0	?
15. Quel est votre niveau de confiance à monter et descendre de bus à travers la rampe d'accès de pente moyenne ou forte?	20.0	?
16. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans la zone d'embarquement et de débarquement de longueur libre de moins de 2.4m et de largeur de moins 1.5m?	35.0	?
17. Quel est votre niveau de confiance à monter une pente plus de 1 :20 (5%) et bateau pavé de plus de 1 :10 (10 %)?	50.0	?
18. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans une zone d'arrêt achalandées?	0.0	?

Figure 26 : Question 18 dans Profil utilisateur

En passant à la planification, un itinéraire a été proposé par le système. L'utilisateur devrait utiliser son fauteuil roulant pour aller à l'arrêt de bus « 1561 Université Laval » puis il prend le parcours 800 ou 801 et il descend à l'arrêt de bus « 1560 C. Parlementaire ». Enfin, il se déplace par son fauteuil roulant pour arriver à sa destination B. La figure suivante montre le trajet planifié pour cet utilisateur.

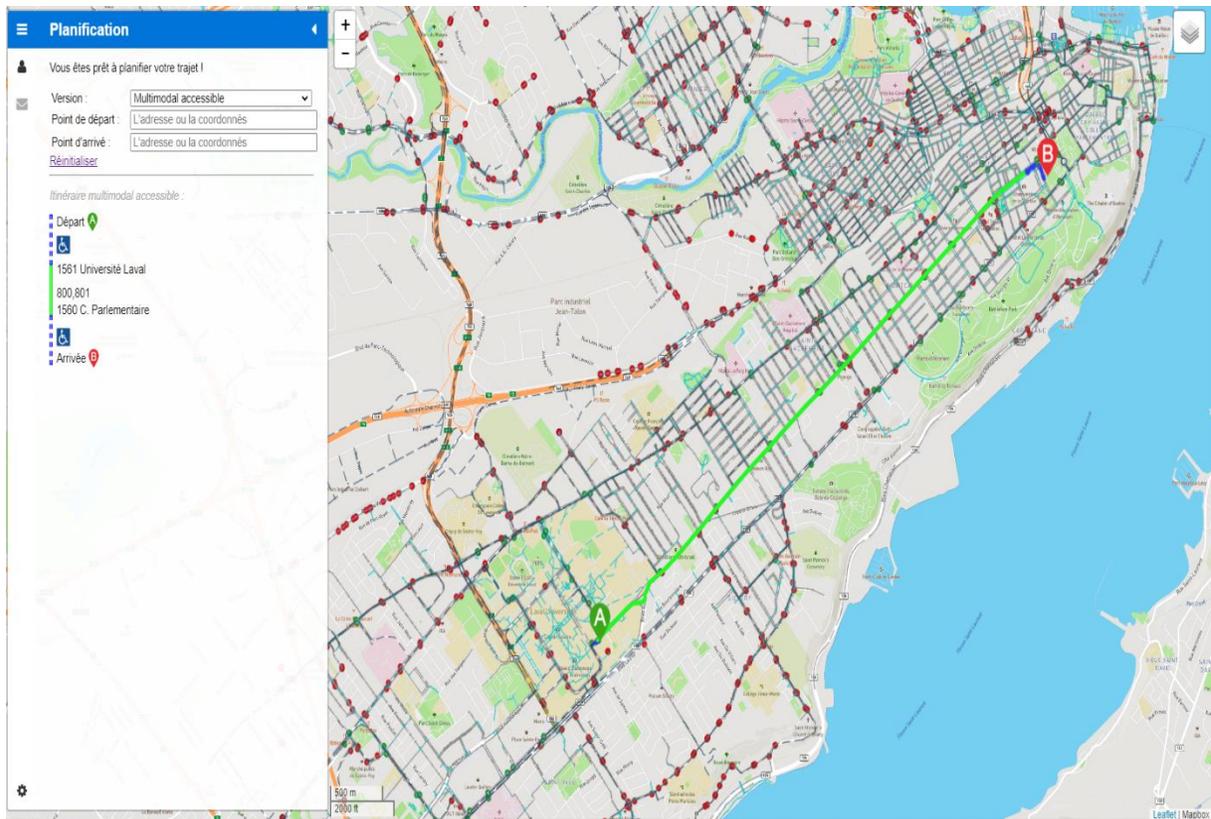


Figure 27 : Trajet planifié pour le scénario 1

Nous avons fait la même planification sur Google Maps et le même trajet a été obtenu. Le résultat est logique puisque pour ce trajet nous avons les parcours 800 et 801 accessibles pour les personnes en fauteuil roulant. En plus, les arrêts qui sont près de point de départ et d'arrivée sont tous les deux accessibles pour les personnes en fauteuil roulant.

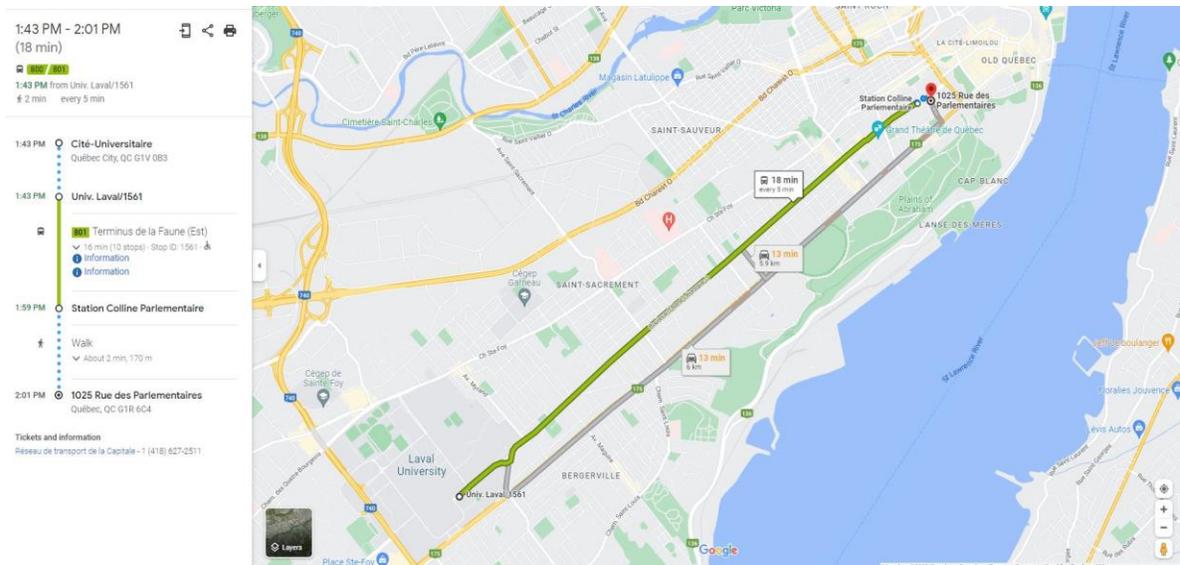


Figure 28 : Trajet obtenu par Google Maps

Par contre, dans l'interface de planification de notre système nous remarquons un niveau d'accessibilité très faible pour cet utilisateur à l'arrêt de l'université Laval puisqu'il est achalandé (nous avons mis cet arrêt achalandé dans la base de données de notre réseau pour faire les tests), les données sur l'achalandage dans la base de données ne sont pas précises et ils sont mis seulement pour tester le système. En outre, nous avons consulté les données de sorties remis par le serveur suite à cette planification pour confirmer le résultat obtenu pour l'indice d'accessibilité comme présenté dans la figure suivante.

```

{
  type: "FeatureCollection",
  - features: [
    + { ... },
    + { ... },
    + { ... },
    + { ... },
    + { ... },
    + { ... },
    - {
      type: "Feature",
      id: "view_msig_fromatob_8_1.fid--24886163_183f7c4c7af_-7b62",
      - geometry: {
        type: "LineString",
        - coordinates: [
          - [
              -71.27014519,
              46.77940627
            ],
          - [
              -71.27019988,
              46.77945389
            ]
        ]
      },
      geometry_name: "geom",
      - properties: {
        seq: 6,
        gid: 92041,
        nom_topogr: null,
        cote_rue: null,
        type_segment: "connector accessible",
        p_decision: "SI",
        parc_acc: null,
        stop_id: "1561",
        stop_name: "Université Laval",
        nc_total: "VL"
      }
    },
  ],
  - {

```

Figure 29 : Niveau d'accessibilité très faible "VL" au niveau de l'arrêt de l'université Laval

La figure 30 nous montre le niveau d'accessibilité très faible pour l'arrêt de l'université Laval pour cet utilisateur.

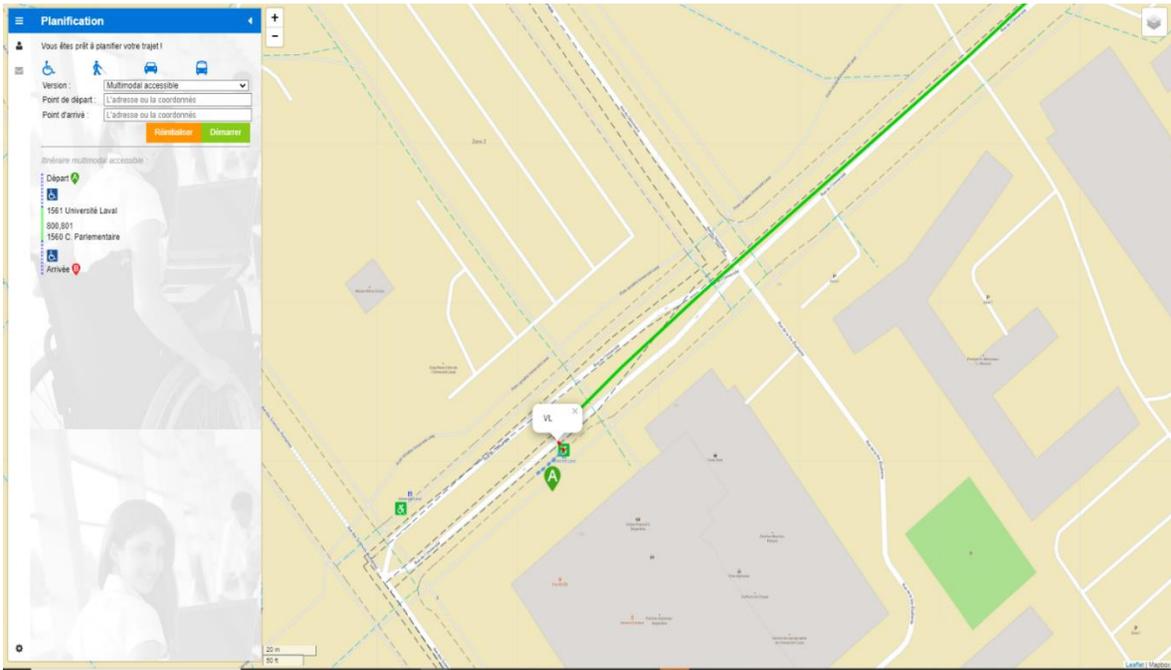


Figure 30 : Niveau d'accessibilité faible pour l'arrêt de l'université Laval

En plus, l'interface nous montre un niveau d'accessibilité très faible pour cet utilisateur près de point d'arrivée comme illustré dans la figure 31, à cause des pentes qui sont supérieures à 5%.

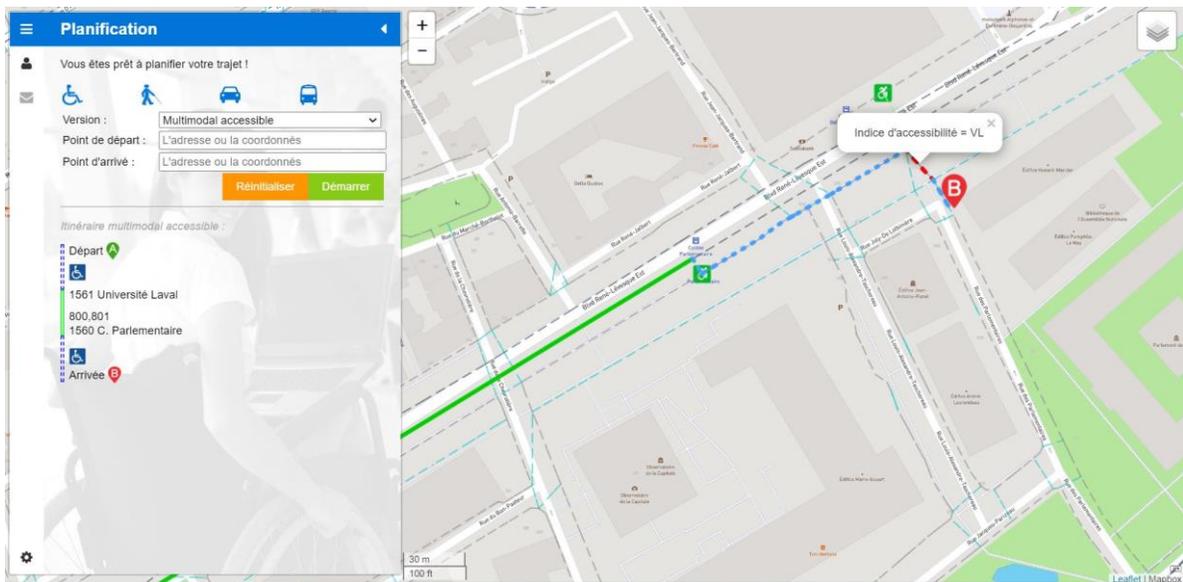


Figure 31 : Niveau d'accessibilité très faible à cause des pentes >5%

Maintenant, nous allons appliquer notre fonction de routage qui nous propose un itinéraire accessible selon le profil de cet utilisateur en évitant tous les problèmes d'accessibilité. Alors, un nouvel itinéraire composé de 3 parcours (807, 804 et 800 ou 801) et 3 transferts qui évite l'arrêt de départ achalandé et l'itinéraire qui présente de faibles niveaux d'accessibilité près de point d'arrivée. En effet, cet itinéraire est le plus optimal en termes d'accessibilité et temps de déplacement puisqu'il est accessible selon le profil de l'utilisateur et il favorise l'itinéraire qui a le moins de temps de déplacement possible. La nouvelle planification est présentée dans la figure 32.

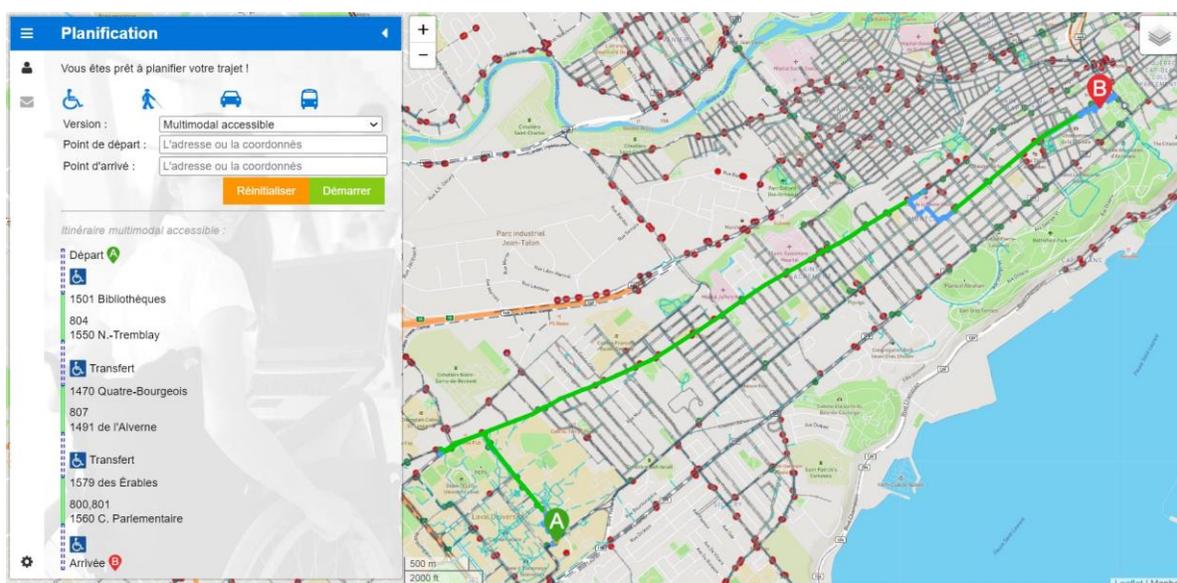


Figure 32 : La nouvelle planification avec l'algorithme de routage adapté avec le profil de l'utilisateur

Nous faisons un Zoom Avant sur le nouvel itinéraire qui évite l'arrêt de départ achalandé et la remplace par l'arrêt de « 1501 Bibliothèques » comme illustrée dans la figure 33.

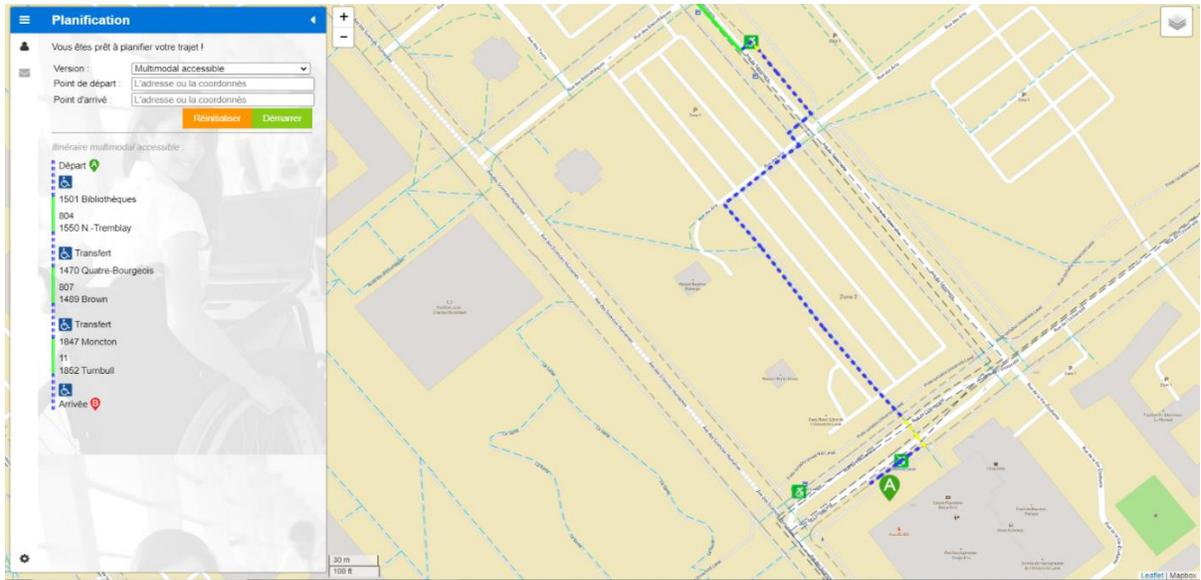


Figure 33 : Zoom Avant sur l'itinéraire près l'arrêt de l'université Laval

Un autre Zoom Avant sur le nouvel itinéraire près de point d'arrivée. Cet itinéraire ne présente aucun problème d'accessibilité pour cet utilisateur comme présenté dans la figure 34.

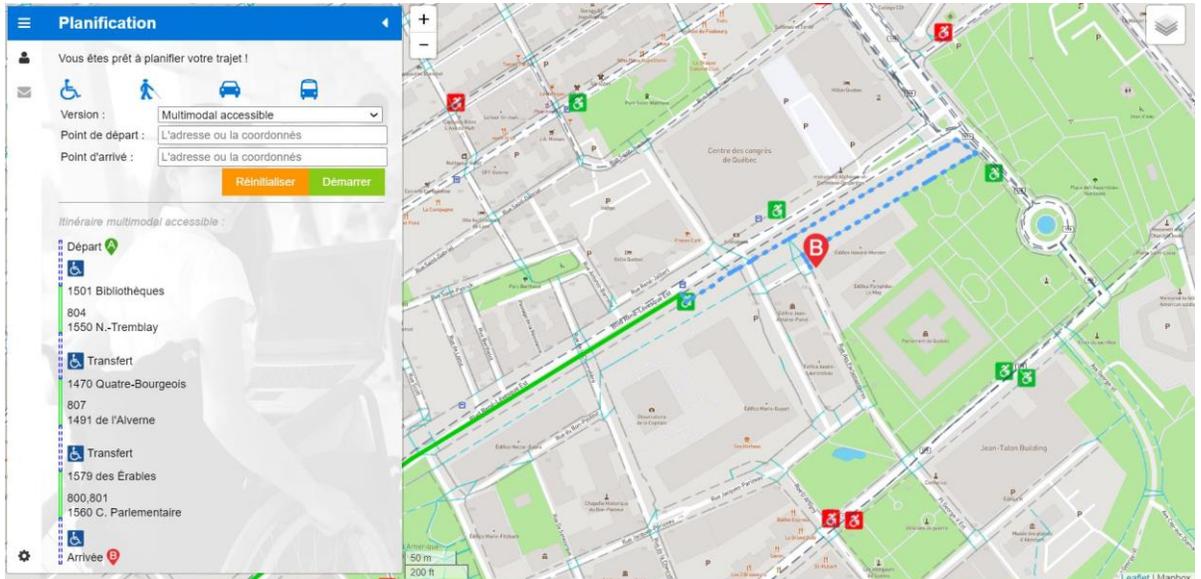


Figure 34 : Représentation du nouvel itinéraire près de point d'arrivée accessible selon le profil de l'utilisateur

## Scénario 2 :

Une personne en fauteuil roulant veut aller de chemin Quatre Bourgeois vers le musée de la civilisation, il a un niveau de confiance faible envers les arrêts achalandés en plus un niveau de confiance très faible envers les pentes > 5%.

13. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans abribus?	<input type="text" value="30.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>
14. Quel est votre niveau de confiance à attendre le bus dans un arrêt sans Planibus?	<input type="text" value="40.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>
15. Quel est votre niveau de confiance à monter et descendre de bus à travers la rampe d'accès de pente moyenne ou forte?	<input type="text" value="20.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>
16. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans la zone d'embarquement et de débarquement de longueur libre de moins de 2.4m et de largeur de moins 1.5m?	<input type="text" value="35.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>
17. Quel est votre niveau de confiance à monter une pente plus de 1 :20 (5%) et bateau pavé de plus de 1 :10 (10%)?	<input type="text" value="50.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>
18. Quel est votre niveau de confiance à monter/descendre le bus dans une zone d'arrêt achalandées?	<input type="text" value="30.0"/>	<input style="border: 1px solid #00aaff;" type="button" value="?"/>

Figure 35 : Interface profil utilisateur pour scénario 2

En passant à l'interface de planification, un itinéraire a été proposé par le système. L'utilisateur devrait utiliser son fauteuil roulant pour aller à l'arrêt de bus « 1470 Quatre Bourgeois » puis il prend le parcours 807 et il descend à l'arrêt de bus « 1952 Turnbull ». Enfin, il se déplace par son fauteuil roulant pour arriver à sa destination B. La figure suivante montre le trajet planifié pour cet utilisateur.

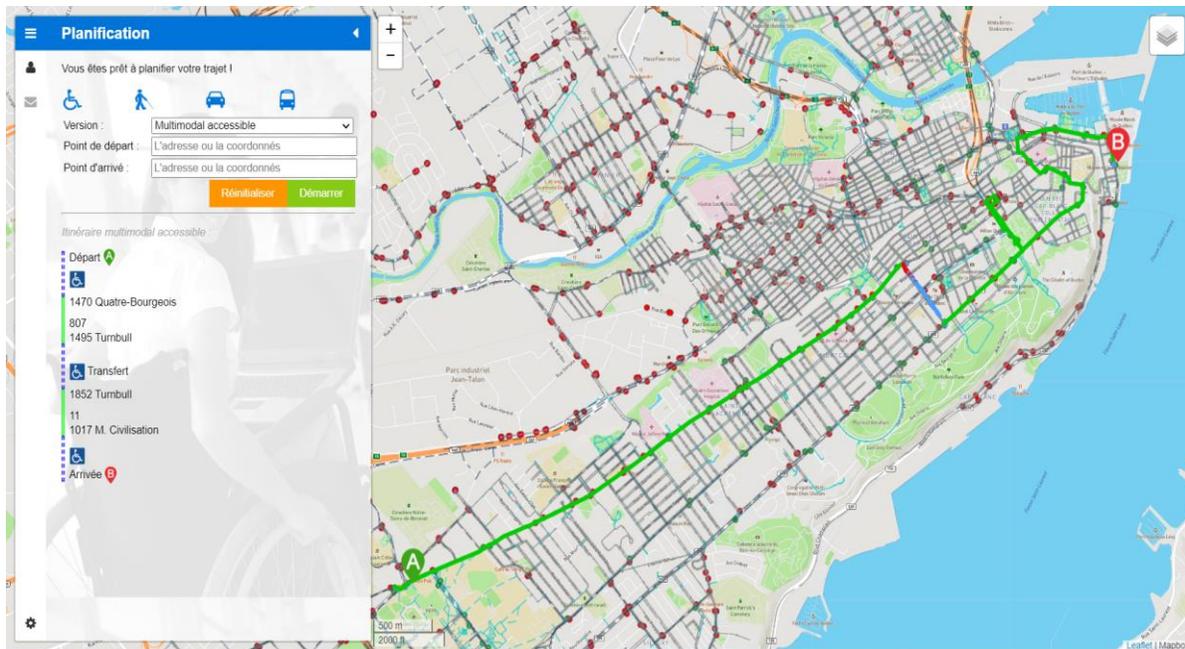


Figure 36 : Trajet de planification pour scénario 2

Nous avons planifié ce trajet du même point de départ A jusqu'au même point d'arrivée B sur Google Maps et malgré qu'il propose des bus accessibles 807 et 11, mais il propose un arrêt inaccessible pour les PFRs qui est le Terminus D'Youville, ce qui fait la différence entre notre trajet et celui de Google Maps. Le trajet planifié sur Google Maps est présenté dans la figure 37 :

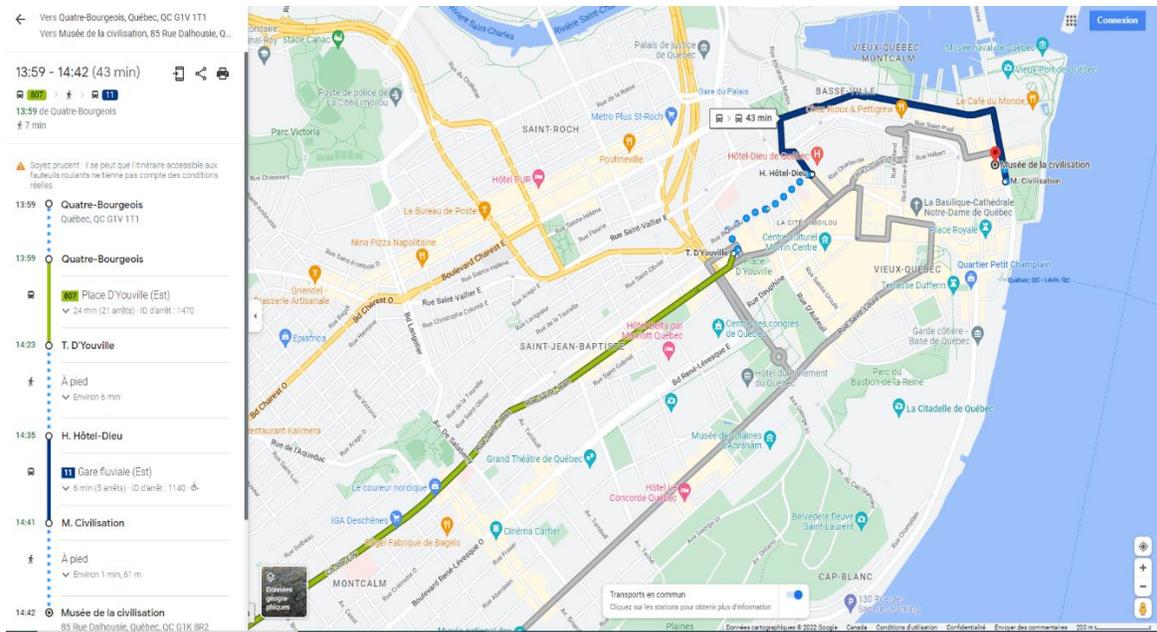


Figure 37: Trajet planifié sur Google Maps

En revenant à notre interface de planification, nous constatons que dans le transfert (le déplacement en fauteuil roulant d'un arrêt de bus à autre arrêt de bus pour changer les parcours de bus) il y a un niveau d'accessibilité très faible pour cet utilisateur puisqu'il a un niveau de confiance très faible envers les pentes > 5% comme illustré dans la figure 38.

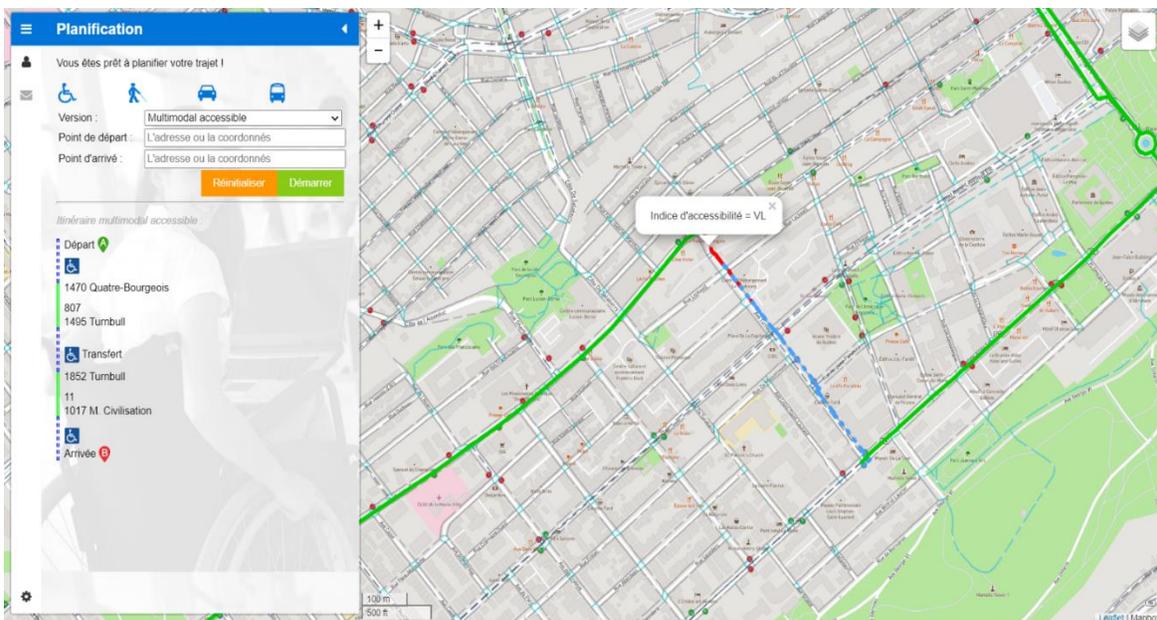


Figure 38: Niveau d'accessibilité très faible dans le transfert pour le scénario 2

En plus, une autre notification textuelle nous a été affichée dans l'interface de planification que pour l'arrêt du musée de la Civilisation pour cet utilisateur le niveau d'accessibilité est faible puisqu'il a rempli un niveau de confiance faible 30% envers les arrêts achalandés. En effet, nous avons consulté la réponse au niveau de serveur qui décrit l'itinéraire proposé sous forme de données Geojson dont nous avons pu confirmer l'information sur l'accessibilité au niveau de cet arrêt de bus comme indique la figure 39 suivante et la figure 40 qui affiche la notification textuelle sur l'interface de planification.

```
    },
    geometry_name: "geom",
  - properties: {
      seq: 186,
      gid: 83239,
      nom_topogr: null,
      cote_rue: null,
      type_segment: "connector accessible",
      p_decision: "SI",
      parc_acc: null,
      stop_id: "1017",
      stop_name: "M. Civilisation",
      nc_total: "L"
    }
  },
```

Figure 39 : Niveau d'accessibilité faible au niveau de l'arrêt de M. Civilisation au niveau de serveur sous forme de GeoJson

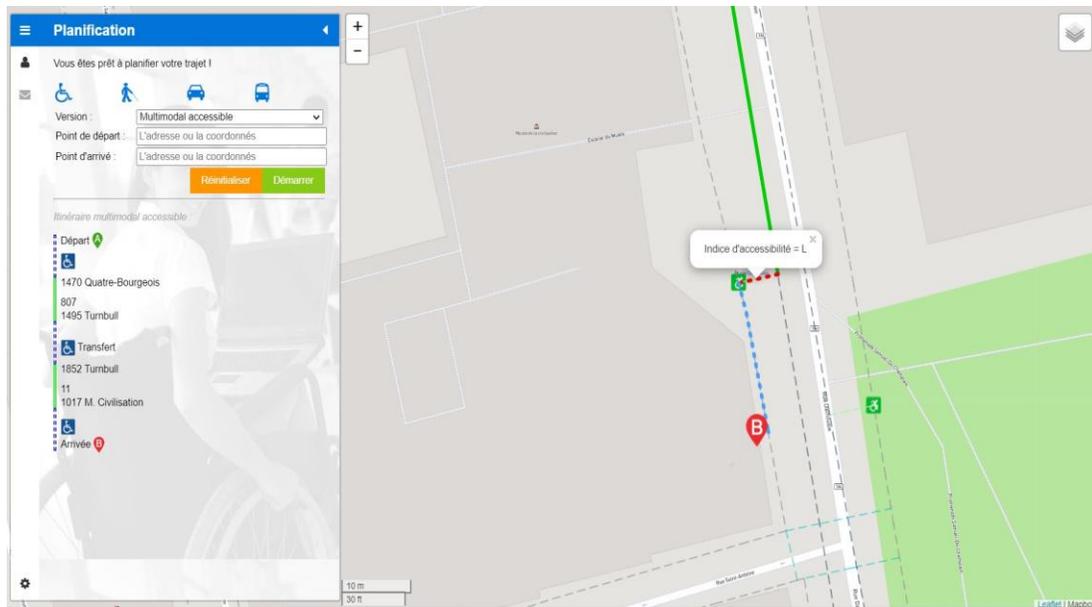


Figure 40: Faible niveau d'accessibilité dans la zone d'arrêt de musée de civilisation pour cet utilisateur dans ce scénario

Nous avons consulté les niveaux d'accessibilités de ces segments problématiques au niveau de serveur pour confirmer les résultats obtenus. La figure suivante nous montre le résultat au niveau de serveur sous format de GeoJson<sup>15</sup> de l'indice d'accessibilité pour l'arrêt de musée de Civilisation.

<sup>15</sup><https://doc.arcgis.com/en/arcgisonline/reference/geojson.htm#:~:text=GeoJSON%20is%20an%20open%20standard,variet%20of%20geographic%20data%20structures.>

```

    },
    geometry_name: "geom",
  - properties: {
      seq: 186,
      gid: 83239,
      nom_topogr: null,
      cote_rue: null,
      type_segment: "connector accessible",
      p_decision: "SI",
      parc_acc: null,
      stop_id: "1017",
      stop_name: "M. Civilisation",
      nc_total: "L"
    }
  },

```

Figure 41 : Niveau d'accessibilité faible au niveau de l'arrêt M. Civilisation décrit en format GeoJson

En appliquant la fonction de routage dans l'autre interface de planification, nous obtenons un autre itinéraire qui évite les problèmes d'accessibilité pour cet utilisateur dans les transferts en changeant les arrêts de transferts et l'arrêt finale M. civilisation qui est sans abribus. Dans le nouvel itinéraire, les arrêts de transferts ont été changé et l'arrêt d'arrivée de M. Civilisation a été changé par un autre arrêt accessible pour cet utilisateur qui est le « 1110 des Navigateurs » comme présenté dans la figure 42.

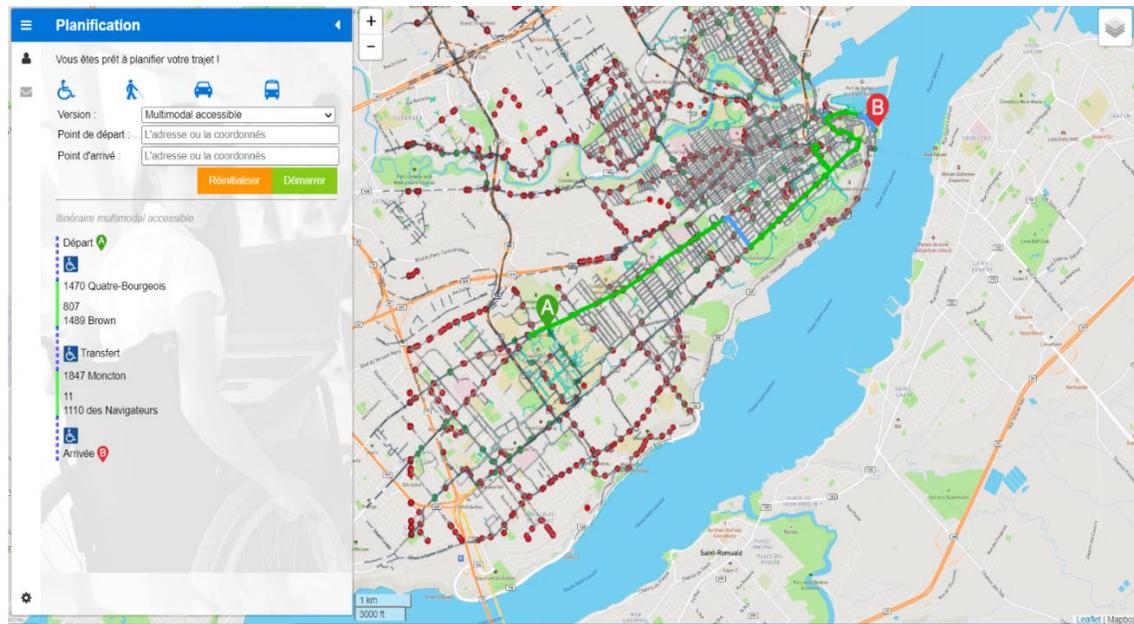


Figure 42 : Résultat du nouvel itinéraire accessible selon le profil utilisateur

## 5.8 Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons développé notre système d'aide à la planification d'un déplacement multimodal suivant notre approche et méthodologie décrite dans les chapitres 3 et 4. En premier temps, nous avons présenté l'architecture de notre système ainsi que les choix technologiques. En second temps, nous avons expliqué la méthodologie de conception de réseau multimodal et l'intégration de la base de données dans le serveur de gestion de base de données open source PostgreSQL/Postgis. Puis, nous avons implémenté notre algorithme de routage dans l'algorithme pgRouting en définissant les sens de direction de réseau de transport et en intégrant la mesure de l'accessibilité de déplacement dans cet algorithme. Finalement, nous avons présenté deux scénarios démonstratifs dont nous avons discuté les résultats obtenus.

## Conclusion

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet MobiliSIG, qui vise à concevoir et développer un outil d'assistance pour les personnes à mobilité réduite utilisatrices de fauteuil roulant dans leurs déplacements quotidiens et leur accès à l'environnement. Notre travail se situe plus spécifiquement dans la phase d'exploitation de ressources de projet MobiliSIG dans le but de concevoir un système de planification en déplacement multimodal adapté aux différents profils des PFR. Les différentes solutions technologiques d'aide à la planification existante n'offrent pas la possibilité de déplacement multimodal accessible adapté aux profils des PFR. La présence d'un tel outil est indispensable pour faciliter le déplacement des personnes en fauteuil roulant.

### **Retour sur les objectifs de recherche :**

L'objectif général de ce projet était de concevoir et développer un système web de planification des itinéraires personnalisés et adaptés au profil des personnes à mobilité réduite qui se déplacent en fauteuil roulant dans un contexte de déplacement multimodal.

Pour atteindre l'objectif général de ce projet, nous avons commencé par identifier et définir les facteurs environnementaux en lien avec le déplacement multimodal de personnes à mobilité réduite se déplaçant en fauteuil manuel. Ensuite, nous avons adapté une méthode d'évaluation de l'accessibilité personnalisée dans le contexte de déplacement multimodal. Puis, nous avons développé un algorithme de routage et des fonctionnalités pour une application géospatiale web qui propose des itinéraires accessibles pour le déplacement multimodal des personnes en fauteuil roulant. Finalement une étape d'évaluation et validation de l'utilisabilité de l'application a été réalisée pour la concrétisation de l'objectif général de notre projet.

## **Bilan des étapes de notre recherche et discussions :**

Nous avons présenté en 1<sup>ère</sup> étape l'introduction, la problématique, l'hypothèse, les objectifs et la méthodologie.

Ensuite, une étude exhaustive a été passée en revue littérature sur les concepts et définitions en liaison avec notre thématique de recherche tels que le handicap, accessibilité, la multimodalité de transport et sur les outils et systèmes développés qui proposent une aide à la navigation pour les personnes en fauteuil roulant ainsi que les systèmes offrant la possibilité d'un transport multimodal. En effet, nous avons étudié en partie les algorithmes de routage qui ont été utilisés. Par la suite, nous avons saisi la nécessité de recherche des facteurs socio-environnementaux qui affectent l'accessibilité dans un contexte de déplacement multimodal. En rappel des parties essentielles qui composent le système MobiliSIG, nous trouvons que la définition du profil utilisateur est indispensable pour pouvoir planifier un itinéraire personnalisé selon les capacités de l'utilisateur et profiter du module de navigation. Donc, trois modules composant l'architecture de système dont le profil de l'utilisateur fait partie de ces modules. Une révision de cette partie était obligatoire pour déterminer les facteurs socio-environnementaux et définir les questions pertinentes dans le profil d'utilisateur pour pouvoir analyser l'accessibilité et offrir un itinéraire personnalisé basé sur les confiances de l'utilisateur concernant les facteurs affectant l'accessibilité dans son déplacement multimodal ce qui nous a mené au chapitre 3, là où nous avons identifié ces facteurs et nous avons défini les questions qui s'ajoutent au formulaire des questions de module Interface utilisateur, puis une approche de personnalisation de l'itinéraire visant un déplacement accessible adapté au profil de l'utilisateur a été adopté. En effet, l'approche floue a été utilisée dans cette partie pour calculer l'indice d'accessibilité qui est implémenté en termes de cout dans l'algorithme Dijkstra pour la recherche de l'itinéraire accessible selon le profil de l'utilisateur. Cependant, les indices d'accessibilité calculés selon cette approche ne sont pas assez précis pour la mesure de l'accessibilité de déplacement par exemple on ne peut pas avoir une différence entre les indices d'accessibilité trop bas et bas les deux sont considérés non accessible comme les indices d'accessibilité très élevés et élevés les deux sont considérés accessibles sans aucune différence entre eux dans l'algorithme développé. Par la suite, et dans le but de développer l'algorithme de routage, nous avons développé une méthode de calcul de l'accessibilité de déplacement en adoptant l'approche de logique floue

en se basant sur le profil d'utilisateur pour calculer les indices d'accessibilité de chaque segment de réseau de déplacement et nous l'avons intégré dans l'algorithme de pgRouting en appliquant l'algorithme Dijkstra modifié (avec des couts modifiés).

Une fois les couts calculés, ils seront intégrés avec l'algorithme Dijkstra modifié pour le calcul de l'itinéraire multimodal accessible. Ainsi, les sens de directions des routes sont nécessaires pour les réseaux de transports donc une intégration de ces sens a été implémentée dans l'algorithme. Enfin, tout un travail de déploiement dans la base de données open source PostgreSQL/PostGIS et dans l'extension de calcul de routage pgRouting a été élaboré et lié au serveur Cartographique GeoServer et le serveur Web pour but de développer notre application web et nous avons présenté les résultats et tests des nouvelles fonctionnalités et modules de la nouvelle version de l'application développée dans le chapitre 4.

Le système web développé était conçu pour être un système d'aide à la planification d'un itinéraire pour le déplacement multimodal, mais dans notre zone d'étude (la ville de Québec) il existe seulement le réseau de transport de bus comme transport en commun c'est pour cette raison on avait seulement le réseau des parcours de bus combiné avec le réseau piétonnier. En plus, notre système est en cours de développement, il pourrait y avoir quelques améliorations tels que l'information sur les temps d'attentes dans les arrêts de bus, l'information sur les disponibilités des sièges à bord des bus et l'information sur l'inclinaison de la rampe d'accès de bus pour chaque zone d'arrêt qui dépend de la hauteur de trottoir et le degré de déploiement de la rampe.

Enfin, nous avons réussi à développer un système capable d'offrir un itinéraire multimodal en plus de la planification d'un trajet personnalisé selon le profil de l'utilisateur. En effet, nous pouvons dire que nous avons atteint la majorité de nos objectifs. Ainsi, nous pensons qu'avec des tests réalisés avec des utilisateurs de fauteuil roulant dans des conditions réelles pourront confirmer la réalisation de nos objectifs.

#### **Travaux futurs et perspectives :**

Dans le cadre de ce projet de recherche, faute de défis techniques et du temps nous nous sommes limités à une base de données statiques, c'est-à-dire qui n'est pas capable d'offrir un service de transport en temps réel. Ainsi, vu la particularité de notre système qui offre un outil d'aide à la navigation en déplacement multimodal adapté aux personnes en fauteuil

roulant, il sera pertinent d'ajouter les horaires de passage des transports, l'itinéraire à choix multiples c'est-à-dire un système qui offre plus de choix d'arrêt de bus et de parcours et de proposer le bus convenable selon l'heure d'arrivée de la personne et son trajet.

Aussi, il sera pertinent de tester l'utilisabilité de l'application web de MobiliSIG, avec des personnes utilisatrices de fauteuil roulant et ajouter d'autres profils utilisateurs avec différentes incapacités comme les personnes sourdes et les personnes aveugles et nous pouvons aussi intégrer de nouveaux réseaux de déplacement multimodal comme le Tramway, métro, etc. En effet, ces tests pourront nous donner une bonne vision sur les points à améliorer dans notre application.

Finalement, nous recommandons dans le futur de travailler sur le module de navigation et l'adapter avec le transport multimodal. De ce fait, nous proposons de montrer les facilitateurs dans l'itinéraire de l'utilisateur par exemple pour un arrêt de bus qui est avec un Atribus et l'utilisateur préfère les arrêts en Atribus, une instruction pourra être déclenchée si l'utilisateur est près de cet arrêt pour lui informer que l'arrêt présente un Atribus.

# Bibliographies

- Beale, L., Field, K., Briggs, D., Picton, P., & Matthews, H. (2006). Mapping for wheelchair users: Route navigation in urban spaces. *Cartographic Journal*, 43(1), 68–81.  
<https://doi.org/10.1179/000870406X93517>
- Bernhoft, I., & Carstensen, G. (2008). Preferences and behaviour of pedestrians and cyclists by age and gender. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 11, 83–95.  
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2007.08.004>
- Bretto, A., Faisant, A., & Hennecart, F. (2012). Théorie algébrique. In A. Bretto, A. Faisant, & F. Hennecart (Eds.), *Éléments de théorie des graphes* (pp. 183–212). Springer Paris. [https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0281-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-2-8178-0281-7_6)
- CHOOSUMRONG, S., RAGHAVAN, V., & BOZON, N. (2012). Multi-Criteria Emergency Route Planning Based on Analytical Hierarchy Process and pgRouting. *Geoinformatics*, 23(4), 159–167.  
<https://doi.org/10.6010/geoinformatics.23.159>
- Febbraro, A. Di, & Sacone, S. (1996). *Modelling and Performance Analysis of Urban Transportation Networks BT - Advanced Methods in Transportation Analysis* (L. Bianco & P. Toth (eds.); pp. 93–116). Springer Berlin Heidelberg.
- Fougeyrollas, P, L, N., H, B., R, C., SA, D., & G., S.-M. (1998). Social consequences of long term impairments and disabilities: conceptual approach and assessment of handicap. *International Journal of Rehabilitation Research*, 21(2), 121–147.
- Fougeyrollas, Patrick. (2010). *La funambule, le fil et la toile. Transformations réciproques du sens du handicap.*
- Fougeyrollas, Patrick, Bergeron, H., Cloutier, R., Côté, J., & St-Michel, G. (1998). *Classification québécoise : Processus de production du handicap. Fougeyrollas Patrick, Bergeron Hélène, Cloutier René, Côté Jacques et St-Michel Ginette, Québec RIPPH.*
- Gharebaghi, A. (2018). *Évaluation Et Représentation Spatiotemporelle De L ' Accessibilité Des Réseaux Piétonniers Pour Le Déplacement Des Personnes À Mobilité Réduite Évaluation Et Représentation Spatiotemporelle De L ' Accessibilité Des Réseaux Piétonniers Pour Le Déplacement .*
- Gharebaghi, A., & Mostafavi, M. A. (2016). A NEW ONTOLOGICAL PERSPECTIVE FOR INTEGRATION OF SOCIAL AND PHYSICAL ENVIRONMENTS: DISABILITY AND REHABILITATION CONTEXT. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III–2, 137–142.  
<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-2-137-2016>

- Gräbener, T., Berro, A., & Duthen, Y. (2010). Time dependent multiobjective best path for multimodal urban routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 36, 487–494.  
<https://doi.org/10.1016/j.endm.2010.05.062>
- Handimap. (2010). *Handimap*. Communiquer Sur l'accessibilité.
- Hashemi, M., & Karimi, H. A. (2017). Collaborative personalized multi-criteria wayfinding for wheelchair users in outdoors. *Transactions in GIS*, 21(4), 782–795. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/tgis.12230>
- Hillman, R., & Pool, R. F. (1997). GIS-based innovations for modelling public transport accessibility. *Traffic Engineering and Control*, 38, 554–559.
- Idri, A., Oukarfi, M., Boulmakoul, A., Zeitouni, K., & Masri, A. (2017). A new time-dependent shortest path algorithm for multimodal transportation network. *Procedia Computer Science*, 109, 692–697.  
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.379>
- Jonietz, D., Schuster, W., & Timpf, S. (2013). Modelling the Suitability of Urban Networks for Pedestrians: An Affordance-Based Framework. In D. Vandembroucke, B. Bucher, & J. Crompvoets (Eds.), *Geographic Information Science at the Heart of Europe* (pp. 369–382). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-00615-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00615-4_21)
- Jr EN, B., & AM, P. (1997). *Enabling America: Assessing the Role of Rehabilitation Science and Engineering*.
- Kasemsuppakorn, P., & Karimi, H. A. (2009). Personalised routing for wheelchair navigation. In *Journal of Location Based Services* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/17489720902837936>
- Kilkens, O. J., Dallmeijer, A. J., de Witte, L. P., van der Woude, L. H., & Post, M. W. (2004). The wheelchair circuit: construct validity and responsiveness of a test to assess manual wheelchair mobility in persons with spinal cord injury 11No commercial party having a direct financial interest in the results of the research supporting this article. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 85(3), 424–431.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmr.2003.05.006>
- Kirby, R., Swuste, J., Dupuis, D., MacLeod, D., & Monroe, R. (2002). The Wheelchair Skills Test: A pilot study of a new outcome measure. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83, 10–18.  
<https://doi.org/10.1053/apmr.2002.26823>
- Liu, S., & Zhu, X. (2004). Accessibility Analyst: An integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 105–124.  
<https://doi.org/10.1068/b305>
- Lizotte, D., & Fougeyrollas, P. (1997). Du droit comme facteur déterminant de la participation sociale des personnes ayant des incapacités. *Les Cahiers de Droit*, 38, 371. <https://doi.org/10.7202/043444ar>
- Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research*, 153(2), 400–416.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00161-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00161-9)

- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- Matthews, H., Beale, L., Picton, P., & Briggs, D. (2003). Modelling Access with GIS in Urban Systems (MAGUS): Capturing the experiences of wheelchair users. *Area*, 35(1), 34–45. <https://doi.org/10.1111/1475-4762.00108>
- Mobasheri, A., Deister, J., & Dieterich, H. (2017). Wheelmap: the wheelchair accessibility crowdsourcing platform. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0040-5>
- Mortenson, W. B., Miller, W. C., & Miller-Pogar, J. (2007). Measuring wheelchair intervention outcomes: development of the wheelchair outcome measure. *Disability and Rehabilitation. Assistive Technology*, 2(5), 275–285. <https://doi.org/10.1080/17483100701475863>
- Nasirzadehdizaji, R. (2017). *Application of Integrated LBS Contribution of GLONASS in Multi-GNSS Solution Accuracy*. May.
- Neis, P. (2015). Measuring the Reliability of Wheelchair User Route Planning based on Volunteered Geographic Information. *Transactions in GIS*, 19(2), 188–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/tgis.12087>
- Nes, R. Van. (2002). Design of multimodal transport networks: A hierarchical approach. In *Proefschrift*. OPHQ. (2018). *Aménagement des lieux fréquentés par le public - Office des personnes handicapées du Québec*. OPHQ.
- OPHQ. (2019). *Home - Quebec Office for Disabled Persons*. OPHQ.
- Rushton, P. W., Miller, W. C., Kirby, R. L., & Janice, J. (2013). Measure for the assessment of confidence with manual wheelchair use (wheelcon-m) version 2.1: Reliability and validity. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 45(1), 61–67. <https://doi.org/10.2340/16501977-1069>
- Rushton, P. W., Miller, W. C., Kirby, R., Eng, J. J., & Yip, J. (2011). Development and content validation of the Wheelchair Use Confidence Scale: a mixed-methods study. *Disability and Rehabilitation. Assistive Technology*, 6(1), 57–66. <https://doi.org/10.3109/17483107.2010.512970>
- Ruta, A., Li, Y., & Liu, X. (2010). Robust Class Similarity Measure for Traffic Sign Recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(4), 846–855. <https://doi.org/10.1109/TITS.2010.2051427>
- Ryden, K., & Specification, I. (2005). *Open Geospatial Consortium Inc . OpenGIS® Implementation Specification for Geographic information - Simple feature access - Part 1 : Common*.
- Salem, I. E., Mijwil, M. M., Abdulqader, A. W., & Ismaeel, M. M. (2022). Flight-schedule using Dijkstra's algorithm with comparison of routes findings. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(2), 1675–1682. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1675-1682>

- Savard, M.-J. (2010). *GUIDE PRATIQUE D'ACCESSIBILITÉ UNIVERSELLE Manuel d'utilisation AVANT-PROPOS*.
- Schweizer, J., Rupi, F., Filippi, F., & Poliziani, C. (2018). *Generating activity based , multi-modal travel demand for SUMO. 2*, 118–133.
- Steinfeld, Edward, et al. (2012). *Universal\_Design\_Creating\_Inclusive\_Environments\_----\_(CHAPTER\_4\_Practicing\_Universal\_Design)*.
- Svensson, A., & Rydström, M. (2004). A communication network for safe traffic and efficient transportation. *11th Wireless World Research Forum Workshop, Oslo, Norway*.
- Tajgardoon, M., & Karimi, H. A. (2015). Simulating and visualizing sidewalk accessibility for wayfinding of people with disabilities. *International Journal of Cartography*, 1(1), 79–93.  
<https://doi.org/10.1080/23729333.2015.1055646>
- United States Access Board. (2004). *Americans with Disabilities Act and Architectural Barriers Act Accessibility Guidelines*. WBDG.
- Van Nes, R. (2002). Multilevel Network Optimization for Public Transport Networks. *Transportation Research Record*, 1799(1), 50–57. <https://doi.org/10.3141/1799-07>
- Wang, X., Zhang, G., Hong, Z., Guo, H., & Yu, L. (2009). Modeling and Implementing Research of Multimodal Transportation Network. *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*, 2100–2103. <https://doi.org/10.1109/ICISE.2009.752>
- Kirby, R.L., Swuste, J., Dupuis, D.J., MacLeod, D. a., Monroe, R. (2002). The Wheelchair Skills Test: A pilot study of a new outcome measure. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 83, 10–18. doi:10.1053/apmr.2002.26823
- Grabener et al . (2009) .Un modèle pour le calcul de plus court chemin multimodal en milieu urbain
- Sobek, A.D., Miller, H.J. (2006). U-Access: a web-based system for routing pedestrians of differing abilities. *J. Geogr. Syst.* 8, 269–287. doi:10.1007/s10109-006-0021-1
- Nasirzadehdizaji, R. (2017). *Application of Integrated LBS Contribution of GLONASS in Multi-GNSS Solution Accuracy. May*
- Mortenson, W.B., Miller, W.C., Miller-Pogar, J. (2007). Measuring wheelchair intervention outcomes: development of the wheelchair outcome measure. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.* 2, 275–285.
- Gharebaghi, A., Mostafavi, M.A. (2016). A new ontological perspective for integration of social and physical environments: disability and rehabilitation context. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 3.

Managing the Development of Large Software Systems », Winston Royce, (1970), Proceedings of IEEE, P  
329

Mitchell, T. (2005) Web Mapping Illustrated, O'Reilly Media INC., Sebastopol, CA.

Laury. Quentin et Saysanasy. Jessy., (2012). Web Mapping, Conception et développement orientés objet  
d'applications multi-tiers, UFR Sciences et Techniques, p. 32.

Mace R. (1985). Universal design, barrier free environments for everyone. Los Angeles: Designers West.